

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Волгоградский государственный технический университет

А. Е. Новиков, Н. В. Шибитова

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Структурная надёжность

(краткий курс лекций и задания для выполнения СРС)

Учебное пособие



Волгоград
2016

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра «Механика» ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ
лауреат Гос. премии СССР, засл. изобретатель РФ,
д-р техн. наук, профессор В. И. Пындак;

кафедра «Ремонт машин и ТКМ» ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ
д-р техн. наук, доцент Д. С. Гатич;

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Новиков А. Е.

Надёжность технических систем. Структурная надёжность
(краткий курс лекций и задания для выполнения СРС) : учебное пособие /
сост. А. Е. Новиков, Н. В. Шибитова; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Поли-
техник», 2016. – 66 с.

ISBN

В учебном пособии рассмотрены понятия и определения надёжности, алгоритм структурно-логического анализа надёжности технических систем, системы с последовательным, параллельным и комбинированным соединением элементов, в том числе мажоритарные и мостиковые системы. Разобраны методы расчёта технических систем: прямого перебора, комбинаторный, логико-вероятностный, разложения относительно особого элемента и дерево отказов. Представлены методы повышения структурной надёжности технических систем.

Пособие предназначено для очно-заочной и заочной форм обучений полной и сокращённой программ бакалавриата по направлению 18.03.02 – «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», профиль – «Машины и аппараты химических производств».

Ил. 17. Табл. 3. Библиогр.: 14 назв.

ISBN

© Волгоградский государственный
технический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение.....	4
1	Основные понятия и определения надёжности.....	5
1.1	Основные понятия надёжности.....	5
1.2	Классификация технических объектов по надёжности.....	9
1.3	Классификация отказов технических объектов.....	11
2	Анализ надёжности технических систем.....	13
2.1	Системный анализ надёжности.....	13
2.2	Структурно-логический анализ надёжности.....	15
2.3	Структурно-логические схемы надёжности.....	16
3	Методы расчёта структурной надёжности систем.....	21
3.1	Случайные события. Теоремы сложения и умножения вероятностей.....	21
3.2	Расчёт надёжности систем с последовательным соединением элементов.....	25
3.3	Расчёт надёжности систем с параллельным соединением элементов.....	27
3.4	Расчёт надёжности систем методом прямого перебора.....	29
3.5	Расчёт надёжности систем комбинаторным методом.....	32
3.6	Расчёт надёжности систем с использованием логико-вероятностных методов.....	34
3.6.1	Метод логических схем.....	36
3.6.2	Метод относительно особого элемента.....	40
3.6.3	Метод дерева отказов.....	42
3.7	Расчёт надёжности комбинированных систем.....	45
4	Методы повышения структурной надёжности систем.....	48
4.1	Методы повышения надёжности.....	48
4.2	Классификация способов и видов резервирования.....	49
4.3	Понятие кратность резервирования и коэффициент выигрыша надёжности.....	51
4.4	Надёжность систем с резервированием.....	53
4.5	Оптимизация структурного резервирования.....	56
5	Задание и порядок выполнения СРС.....	58
	Библиографический список.....	59
	Приложения.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие по дисциплине «Надёжность технических систем» предназначено для студентов, обучающихся по очно-заочной и заочной формам полной и сокращённой программам бакалавриата в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» (уровень бакалавриата).

В учебном пособии изложен краткий курс лекций, приведены примеры расчёта структурной надёжности технических систем, а также варианты задания для самостоятельной работы студентов.

Успешное освоение лекционного курса и выполнение самостоятельной работы студентами способствует формированию у них следующих профессиональных компетенций соответствующих производственно-технологической деятельности:

1) ПК-5 – готовностью обосновывать конкретные технические решения при разработке технологических процессов; выбирать технические средства и технологии, направленные на минимизацию антропогенного воздействия на окружающую среду;

2) ПК-7 – готовностью осваивать и эксплуатировать новое оборудование, принимать участие в наладивании, технических осмотрах, текущих ремонтах, проверке технического состояния оборудования и программных средств.

Надёжность технических систем – научная дисциплина, в рамках которой изучаются закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и её элементов, влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, решаются проблемы повышения и сохранения надёжности при проектировании, изготовлении и эксплуатации технических систем и их элементов.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

1.1 Основные понятия надёжности

Важнейшей характеристикой любого технического объекта является его *надёжность*, под которой понимается способность объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации. В соответствии с этим целью расчёта надёжности технических объектов является выявление оптимальных конструктивных решений и параметров, определение наиболее эффективных режимов эксплуатации, стратегии технического обслуживания и ремонтов.

Основные понятия в теории надёжности устанавливаются ГОСТ 27.002-89 «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

Понятие *технического объекта* это обобщённый термин, который включает понятия элемент, система, изделие и комплекс. Под *изделием* понимается предмет, имеющий конкретную форму и вид, которые получены в процессе его изготовления. Простейшей составной неделимой частью изделия является *элемент*, который предназначен для выполнения определённых функций. Совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций представляет собой *систему*, а совокупность совместно взаимодействующих изделий в процессе применения их по назначению представляет собой *комплекс*.

Таким образом, совокупность химического и нефтехимического оборудования (элементов), совместно действующего и направленного на достижение общей цели (например, промежуточное или конечное производство продукта) называется химико-технологической системой.

Надёжность – это комплексное свойство технического объекта, которое в зависимости от назначения и условий эксплуатации объекта включает свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Для количественной оценки надёжности технических объектов в качестве показателей безотказности используют: вероятность безотказной работы, средние наработки на отказ, до отказа и между отказами, интенсивность отказов, параметр потока отказов.

Наработка – продолжительность или объём работы объекта, измеряемый в любых неубывающих величинах.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Долговечность характеризуется продолжительностью работы объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами для восстановления его работоспособности в плановых и неплановых ремонтах и при техническом обслуживании. В качестве количественных показателей используют: назначенный и установленный ресурс, средний ресурс, гамма-процентный ресурс, назначенный и установленный срок службы, средний срок службы, гамма-процентный срок службы.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём технического обслуживания и ремонта.

Количественными показателями ремонтпригодности являются: среднее время восстановления, вероятность восстановления.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Количественными характеристиками сохраняемости являются: назначенный, установленный и средний срок сохраняемости, гамма-процентный срок сохраняемости.

К комплексным показателям надёжности, характеризующие одновре-

менно несколько свойств, относятся коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент оперативной готовности, коэффициент сохранения эффективности.

С позиции надёжности объект может находиться:

➤ в *исправном* состоянии – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

➤ в *неисправном* состоянии – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

➤ в *работоспособном* состоянии – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

➤ в *неработоспособном* состоянии – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

➤ в *предельном* состоянии – состояние объекта, при котором дальнейшая его эксплуатация недопустима либо восстановление его работоспособного состояния невозможно.

Под *повреждением* объекта понимается событие, при котором происходит нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.

Событие, при котором происходит нарушение работоспособного состояния объекта, называется *отказом*.

Критерием отказа называют признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Под *ремонт* объекта понимается восстановление исправного или работоспособного состояния объекта, его сохраняемости и долговечности (срока службы и ресурса).

В зависимости от условий применения и принятой системы технического обслуживания выделяют следующие режимы эксплуатации технического объекта:

➤ *режим хранения* – обеспечивает содержание объекта в состоянии готовности к применению и сохранение в заданных пределах его технико-эксплуатационных характеристик. Режим характеризуется условиями хранения (влажность, температура и т.п.), сроками хранения, способами оценки технического состояния и правилами принятия решения о смене режима. В процессе хранения происходит физическое старение объекта (деградация);

➤ *контроль технического состояния* – предназначен для диагностирования и оценки пригодности объекта к дальнейшему использованию. Режим характеризуется применяемыми видами инструментального контроля, способами оценки технического состояния и их достоверностью;

➤ *техническое обслуживание* – предназначено для предупреждения возможных отказов объекта, повышения сохраняемости, поддержания заданного уровня исправности. Режим характеризуется полнотой восстановления, методами обнаружения предотказовых состояний и др.;

➤ *подготовка к применению* – заключается в переводе технического объекта из состояния хранения или ожидания в состояние готовности к применению. Режим характеризуется объёмом работ по подготовке объекта к применению, способами оценки технического состояния, правилами принятия решения о его пригодности к применению;

➤ *применение объекта по назначению* – эксплуатация объекта. Режим характеризуется условиями функционирования, технико-экономическими показателями эффективности, способами оценки технического состояния и правилами принятия решения о дальнейшем использовании объекта.

1.2 Классификация технических объектов по надёжности

При возникновении отказа объект согласно нормативно-технической и (или) конструкторской документации может быть *восстанавливаемым* или *невосстанавливаемым*, *ремонтируемым* и *неремонтируемым*, а также *обслуживаемым* и *необслуживаемым*.

Классификация технических объектов также может осуществляться по последствиям отказов и по долговечности (табл. 1, 2).

В первом случае безотказность определяется по наиболее ответственным узлам и системам объекта, а во втором случае оценивается способность объекта сохранять в течение наработки значения основных параметров, при этом потеря или снижение основных показателей объекта определяет его ресурс до капитального ремонта или списания и затраты на восстановление работоспособности.

Таблица 1

Классификация объектов по последствиям отказа

Последствия отказа	Допустимая вероятность безотказной работы	Примеры
<i>Катастрофические:</i> аварии, катастрофы, невыполнение ответственного задания	$p(t) \rightarrow 1,0$	Летательные аппараты, подъёмно-транспортные машины, военная техника, химическое оборудование
<i>Экономический ущерб:</i> повышенные простои, работа на пониженных режимах или с ухудшенными показателями	$p(t) > 0,9$ (при значительном ущербе $p(t) > 0,99$)	Технологическое оборудование
<i>Без серьёзных последствий:</i> ремонтные затраты в пределах нормы	$p(t) < 0,9$	Отдельные узлы и элементы оборудования

Классификация объектов по долговечности

Категории оборудования	Назначение	Основные параметры
<i>Технологическое:</i> станки, прессы, сварочные агрегаты, текстильное, пищевое, полиграфическое оборудование, сельскохозяйственные и дорожно- строительные машины	Изменение формы и свойств объектов труда	Качество продукции, производительность
<i>Химико-технологическое:</i> машины и аппараты химических производств, металлургическое оборудование	Получение новых веществ и материалов	Качество продукции, производительность, безопасность
<i>Транспортное:</i> автомобили, самолеты, железнодорожный и водный транспорт, подъёмно-транспортные машины	Перемещение объектов	Скорость, безопасность, грузоподъёмность
<i>Энергетическое:</i> электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, турбины	Преобразование энергии	Коэффициент полезного действия, мощность
<i>Контрольно-измерительное:</i> измерительные приборы, сортировочные автоматы, испытательные машины	Контроль параметров объекта	Точность измерений
<i>Счетно-решающее:</i> электронно-вычислительные цифровые и аналоговые машины, компьютеры, калькуляторы	Решение математических задач и вычисления	Правильность и точность решений
<i>Военное:</i> орудия, ракеты, танки, военная авиация	Поражение объекта	Выполнение боевого задания
<i>Медицинское:</i> искусственные органы, хирургические агрегаты	Восстановление здоровья человека	Точность функционирования, безотказность

1.3 Классификация отказов технических объектов

Классификация отказов производится по различным признакам, что обусловлено многообразием технических объектов, в частности, их назначением, конструктивными и технологическими параметрами, характером протекающих в них процессов, а также внешними и внутренними воздействиями.

1. По степени изменения параметров объекта отказы делятся на *функциональные* (выполнение основных функций объектом прекращается, например, насос не подаёт топливо, двигатель не запускается) и *параметрические* (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, снижение подачи топлива насосом, уменьшение мощности двигателя).

2. По природе происхождения отказы подразделяются на *естественные* (происходят непреднамеренно) и *искусственные* (вызываются преднамеренно действиями оператора).

3. По характеру изменения выходного параметра объекта до момента возникновения отказа различают:

➤ *постепенные* отказы – постепенное изменение параметров объекта (износ, старение, коррозия);

➤ *внезапные* отказы – мгновенная потеря работоспособности (поломки, заедания, отключения), как правило, вследствие постепенного накопления неисправностей или повреждений.

4. По причине возникновения отказов различают:

➤ *конструкционные* отказы – вызваны недостатком конструкции;

➤ *производственные* отказы – вызваны срывом технологии изготовления;

➤ *эксплуатационные* отказы – вызваны неправильной эксплуатацией;

➤ *деградационные* отказы – вызваны естественным процессом старения, изнашивания, коррозии или усталости.

5. По признаку устойчивости состояния неработоспособности различают отказы:

➤ *систематические* – многократно повторяющиеся однородные по

определённым признакам самоустраняющиеся отказы;

- *самоустраняющиеся* – устраняются без стороннего вмешательства;
- *устойчивые* – устраняются путём восстановления или ремонта;
- *сбои* – однократные отказы, самоустраняющиеся или устраняемые незначительным вмешательством оператора;
- *перемежающиеся* – многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера.

6. По возможности последующего использования объекта после возникновения его отказа различают *полные* (событие при котором происходит полная утрата работоспособности объекта) и *частичные* (событие, после которого использование объекта по назначению возможно, но при этом значения одного или нескольких параметров находятся вне допустимых пределов) отказы.

7. По наличию внешних проявлений отказы классифицируют на *явные* (появление сопровождается признаками, воспринимаемыми органами чувств наблюдателя или средствами контроля) и *скрытые* (обнаружение невозможно без проведения специальных операций по контролю работоспособности объекта).

8. В зависимости от связи между отказами элементов объекта различают *зависимые* и *независимые* отказы; для выделения отказов-причин и отказов-следствий первые называют *первичными*, а вторые – *вторичными* (результатирующими).

9. В зависимости от возможности устранения отказов различают *устраняемые* и *неустраняемые* отказы.

10. По критичности (значимости) отказы подразделяют на *критические*, *существенные* и *несущественные*.

11. По времени возникновения отказы делят на *приработочные*, отказы *при нормальной эксплуатации (внезапные)* и *последнего периода эксплуатации (износосовые)* отказы. Для объектов, которые проходят испытания и обкатку, также различают отказы при *испытаниях*.

2 АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 Системный анализ надёжности

Исследование надёжности технических систем проводится в рамках системного анализа, сущность которого заключается в инженерном анализе отказов объекта и причин их возникновения, выборе организационных и инженерно-технологических способов повышения надёжности, методов прогнозирования расчёта и оптимизации показателей надёжности, методов синтеза высоконадёжных технических систем.

Системный анализ надёжности технических систем включает стадии:

- анализ технической системы как объекта исследования надёжности;
- разработка математической модели надёжности систем;
- анализ надёжности системы;
- расчёт показателей надёжности;
- выбор способов обеспечения и повышения надёжности;
- оптимизация показателей надёжности или синтез технической системы с заданными показателями надёжности;
- разработка организационных и инженерно-технологических мероприятий по повышению эффективности функционирования технической системы.

Анализ технической системы как объекта исследования надёжности проводится поэтапно:

- декомпозиция технической системы на подсистемы и элементы;
- определение критериев эффективности функционирования элементов, подсистем и системы в целом;
- расчёт и оптимизация параметров функционирования элементов и системы в целом (конструктивные, технологичные и проектные расчёты);
- инженерно-технологический анализ отказов элементов, подсистем и системы в целом (выявление причин возникновения отказов, изучение

влияния отказов элементов и подсистем на работоспособность системы в целом, расчёт показателей надёжности элементов и подсистем).

К математической модели надёжности системы относится математическое описание её функционирования с некоторой степенью приближения. Математический аппарат теории надёжности базируется на основных положениях и теоремах теории вероятностей, теории случайных функций и процессов, математической статистики, математической логики, комбинаторики и теории графов. Математические модели подразделяются на два класса: символьные или символические и структурные или топологические.

Символьные модели надёжности системы представляют собой совокупность алгебраических, интегральных, дифференциальных или логических уравнений, посредством которых можно определить вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний, показатели надёжности системы в зависимости от показателей надёжности её элементов, их взаимодействия друг с другом, а также воздействия внешних факторов (в т.ч. условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонтов).

Топологические модели надёжности системы представляют собой графические отображения влияния отказов элементов на работоспособность системы в целом, которые позволяют определять показатели надёжности системы с учётом особенности её структуры, взаимодействия элементов, эксплуатации, ТО и ремонтов. Топологические модели представляются в виде структурно-логических схем, а также ориентированных или неориентированных графов.

Выбор вида модели надёжности технической системы зависит от её структуры, количества элементов в системе и особенностей их взаимодействия друг с другом, используемых мероприятий по техническому обслуживанию и ремонтам. Наиболее часто используют комбинированные математические модели, сочетающие достоинства символьных и топологических моделей.

Анализ надёжности технической системы проводится по её структурно-логической схеме, полученной в результате структурно-логического анализа.

2.2 Структурно-логический анализ надёжности

Структурно-логический анализ позволяет оценить основные характеристики надёжности технического объекта с учётом особенностей его конструкции, характера функционирования и взаимодействия составных частей, их влияния на надёжность в целом.

При определении структуры технического объекта целесообразно оценить влияние каждого элемента, в т.ч. его работоспособность, на работоспособность объекта в целом. По степени влияния элементы можно разделить на четыре группы:

- элементы, отказ которых не влияет на работоспособность объекта (деформация поверхности, изменение окраски поверхности и т.д.);
- элементы, вероятность отказа которых за рассматриваемый промежуток времени не изменяется и близка к нулю (корпусные детали, станины, малонагруженные элементы с большим запасом прочности);
- элементы, ремонт которых возможен в процессе эксплуатации объекта или во время плановых остановок (замена режущего инструмента на станке, регулировка холостого хода карбюратора и т.д.);
- элементы, отказ которых приводит к отказу объекта.

Структурно-логический анализ надёжности технических систем выполняется в следующем порядке:

- анализ системы – определяются функции отдельных элементов объекта и их взаимосвязи;
- определяются все возможные отказы системы и её составных частей, их причины и последствия на работоспособность системы в целом;
- декомпозиция системы на элементы с известными показателями надёжности;
- составление топологической модели безотказной работы системы;

➤ составление расчётных зависимостей для определения вероятности безотказной работы и других показателей надёжности системы.

Структурно-логический анализ надёжности технических объектов может проводиться на различных этапах их жизненного цикла: при проектировании, изготовлении, испытаниях, монтаже, запуске, эксплуатации и т.д. По результатам расчётов характеристик надёжности и их изменения во времени принимаются решения о необходимости повышения надёжности, о возможности постановки объекта на производство или снятия с производства, об установлении графика ППР, о необходимой номенклатуре и количестве запасных частей, узлов и деталей, о возможности дальнейшей эксплуатации, модернизации, о списании и т.д.

2.3 Структурно-логические схемы надёжности

Практически любая техническая система, в т.ч. химико-технологическая, может быть представлена в виде отдельных унифицированных, функционально законченных элементов, соединённых друг с другом последовательно или параллельно.

Под *последовательным соединением* элементов в систему понимают такое соединение, при котором отказ любого элемента влечёт за собой отказ всей системы (рис. 1).

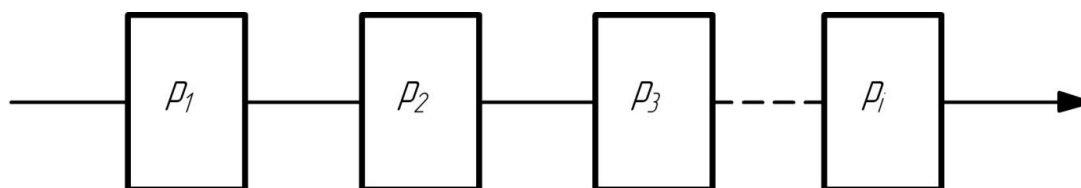


Рис. 1. Схема последовательного соединения элементов в системе

Под *параллельным соединением* элементов в систему понимают такое соединение, при котором отказ системы произойдёт только в случае отказа всех элементов этой системы (рис. 2).

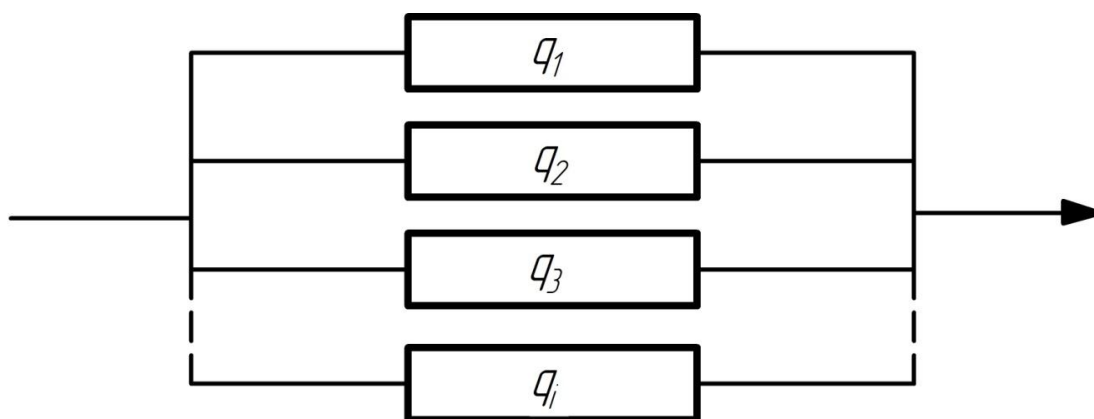


Рис. 2. Схема параллельного соединения элементов в системе

Основным критерием для определения вида соединения элементов является влияние их отказа на работоспособность всей системы. Необходимо учитывать, что структурная схема надёжности и конструктивная схема зачастую не согласуются друг с другом. Например, подшипники на валу редуктора работают параллельно друг с другом, однако выход любого из них приводит к отказу системы, соответственно с позиции надёжности они образуют последовательное соединение. Другой пример: система, состоящая из нескольких насосов работающих последовательно, обеспечивает подачу жидкости к объекту, в случае отказа одного из них система также продолжит функционировать, но с меньшим расходом, т.е. с позиции надёжности насосы между собой соединены параллельно.

При составлении структурно-логической схемы надёжности системы и выборе расчётной модели надёжности системы необходимо также учитывать возможные варианты отказов элементов и их влияние на систему в целом. Например, в системах подачи топлива для увеличения пропускной способности и надёжности системы используют последовательное или параллельное соединение фильтров (рис. 3).

Отказ фильтра может произойти по двум причинам: засорение фильтрующей перегородки или её разрыв. В первом случае (при засорении) структурная схема надёжности будет соответствовать конструктивной

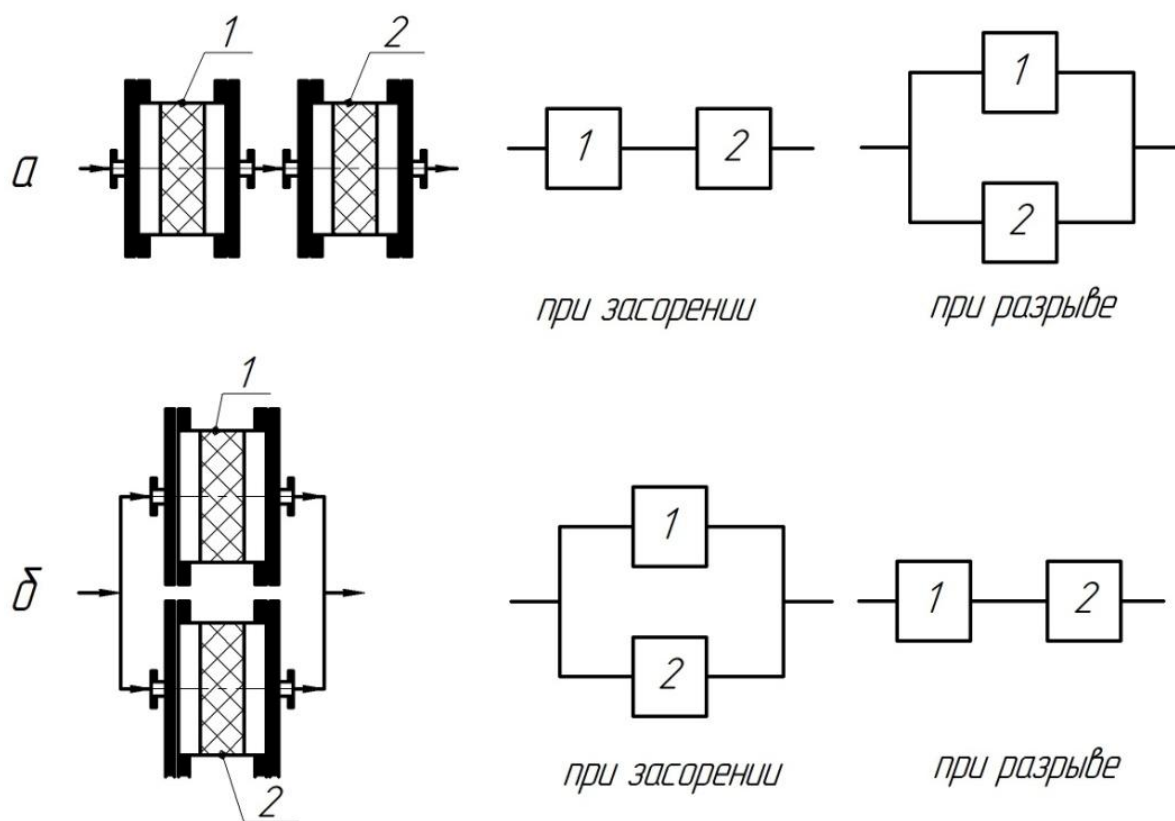


Рис. 3. Конструктивные и структурные схемы соединения фильтров при различных вариантах отказов

схеме системы. Так, при последовательном соединении фильтров засорение любого из них приведёт к отказу всей системы, а при параллельном соединении фильтров – изменяться лишь характеристики системы, но отказ её не произойдёт (рис. 3, а). Во втором случае (при разрыве) структурная схема надёжности будет обратной конструктивной. Так при параллельном соединении фильтров разрыв перегородки в любом из них приведёт к пропуску нефilterованной жидкости в систему, т.е. произойдёт отказ системы, а при последовательном соединении система будет менее работоспособной, но при этом отказ её не произойдёт (рис. 3, б).

Разновидностью систем с параллельным соединением элементов являются *мажоритарные системы*, которые также называются *системами типа «т из n»* или *«схемы голосования»*. Мажоритарные системы широко распространены в электрических и радиосхемах, системах управления, технологических линии-

ях, при структурном резервировании.

Системы типа « t из n » (рис. 4) функционируют только в том случае, если из n элементов системы в работоспособном состоянии находится t элементов. Соответственно если происходит отказ t элементов или больше, то работоспособность системы нарушается и происходит её отказ.

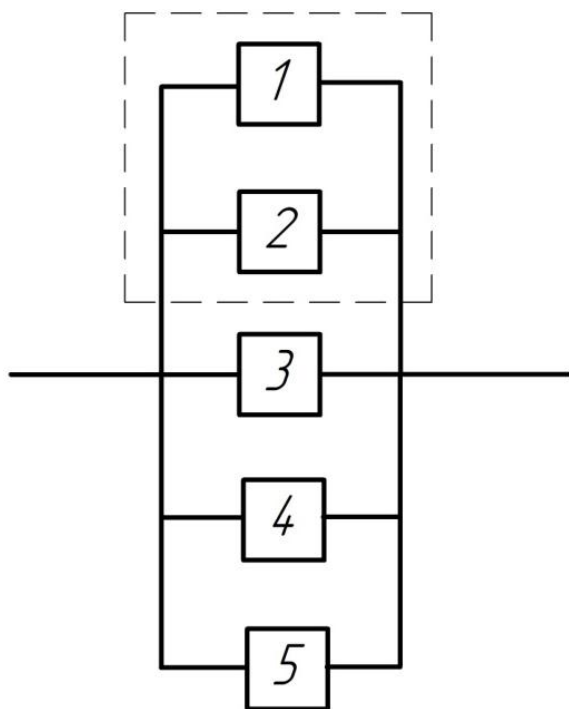


Рис. 4. Мажоритарная система «2 из 5»

В технике также широко распространены *мостиковые системы*. Эти системы (рис. 5) представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, которые включены между узлами различных параллельных ветвей. Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность системы, приведённой на рисунке 5, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 2; 4 и 5; 2, 3 и 4; 1, 3 и 5 и т.д. В то же время отказ элементов 1 и 5; 2 и 4; 1, 3 и 4; 2, 3 и 5 к отказу системы не приведёт.

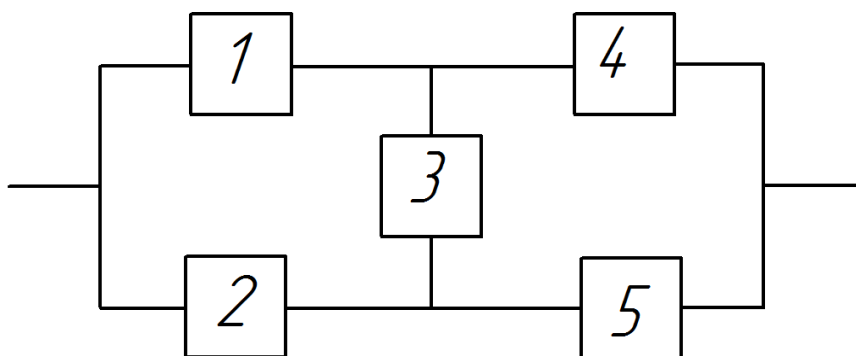


Рис. 5. Мостиковая система из пяти элементов

Примером мостиковой системы является система подачи топлива (рис. 6), которая работает, если исправен хотя бы один из насосов 1 или 2 и срабатывают клапана 3, 4 и 5.

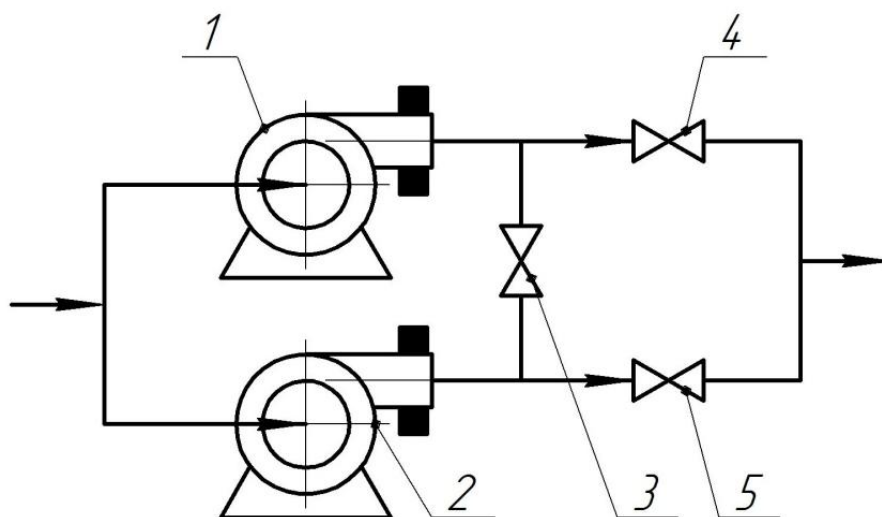


Рис. 6. Мостиковая система подачи топлива

Для расчёта мажоритарных и мостиковых систем используются:

- *метод прямого перебора* (при небольшом количестве элементов);
- *комбинаторный метод* (метод перечисляющих производящих функций);
- *логико-вероятностные методы* (метод минимальных путей и метод минимальных сечений);
- *метод разложения относительно особого элемента*;
- *методом дерева отказов*.

3 МЕТОДЫ РАСЧЁТА СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ

3.1 Случайные события. Теоремы сложения и умножения вероятностей

Отказ системы в теории надёжности считается случайным событием. *Случайным* событием называют событие, которое может произойти обязательно (*достоверное событие*) или не произойти в действительности (*невозможное событие*).

События могут быть *совместными* и *несовместными*. В первом случае появление одного из событий не исключает возможности появления другого, а во втором – появление одного из событий исключает появление другого.

События также могут быть *зависимыми* (появление одного из событий влияет на появление другого события) и *независимыми* (появление одного из событий не влияет на появление другого).

Два события называются *противоположными*, если в данном испытании они несовместны и одно из них обязательно происходит.

Полная совокупность (группа) событий – совокупность событий, хотя бы одно из которых произойдёт обязательно.

Суммой (объединением) событий – называется событие, состоящее в наступлении, по крайней мере, одного из событий или событий вместе, если они совместны.

$$A = A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_n = \bigcup_{i=1}^n A_i, \quad (1)$$

где A – сумма (объединение) событий $A_1, A_2, \dots, A_n$;

$\vee$ (читается «или») – знак операции дизъюнкция или логическое сложение;

$\bigcup$ – знак логической суммы событий.

Сумма событий A_i ($i = 1, 2, \dots, n$), составляющих полную совокупность, и сумма противоположных событий образуют достоверное событие E :

$$\bigcup_{i=1}^n A_i = E; \quad (2)$$

$$A \vee \bar{A} = E, \quad (3)$$

где $\bar{A}$ – событие, противоположное событию A .

Для логической суммы событий справедливы равенства:

$$A \vee A = A; \quad A \vee e = A; \quad A \vee E = E,$$

где e – обозначение невозможного события.

Произведением (пересечением) событий называют события, появление которых эквивалентно появлению всех этих событий одновременно:

$$A = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n = \bigcap_{i=1}^n A_i, \quad (4)$$

где A – произведение (пересечение) событий $A_1, A_2, \dots, A_n$;

$\wedge$ (читается «и») – знак операции конъюнкция или логическое умножение;

$\bigcap$ – знак логического произведения событий.

Для логического произведения событий справедливы равенства:

$$A \wedge A = A; \quad A \wedge e = e; \quad A \wedge E = A; \quad A \wedge \bar{A} = e.$$

Вероятностью случайного события A называется числовая характеристика степени возможности его проявления, равная отношению числа исходов n_i , благоприятствующих его наступлению к числу всех исходов n (несовместных, единственно возможных и равновозможных):

$$P(A) = \frac{n_i}{n}. \quad (5)$$

Вероятность случайного события обладает следующими свойствами:

$$P(e) = 0; \quad P(E) = 1; \quad 0 \leq P(A) \leq 1; \quad P(A) + P(\bar{A}) = 1,$$

где $P(e)$, $P(E)$, $P(A)$ – вероятности невозможного, достоверного и произвольного события A соответственно.

Условной вероятностью называется вероятность случайного события, вычисленная в предположении наступления другого события. Для любых

события A_1 и A_2 :

$$P(A_1 | A_2) = \frac{P(A_1 \cdot A_2)}{P(A_2)} \quad \text{или} \quad P(A_2 | A_1) = \frac{P(A_1 \cdot A_2)}{P(A_1)}. \quad (6)$$

Теоремы сложения вероятностей:

1) вероятность суммы двух независимых событий (т.е. вероятность появления хотя бы одного из событий):

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1) \cdot P(A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 \cdot A_2); \quad (7)$$

2) вероятность суммы произвольного числа независимых событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = 1 - [1 - P(A_1)] \cdot [1 - P(A_2)] \times \\ \times \dots \cdot [1 - P(A_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)]; \quad (8)$$

3) вероятность суммы двух несовместных событий:

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2). \quad (9)$$

4) вероятность суммы произвольного числа несовместных событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i); \quad (10)$$

5) вероятность несовместных событий, составляющих полную совокупность:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = P(E) = 1. \quad (11)$$

Теоремы умножения вероятностей:

1) вероятность произведения двух событий (т.е. вероятность появления всех событий) равна вероятности одного из них умноженной на условную вероятность другого при наличии первого. Тогда в соответствии с формулой (6) получим:

$$P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2 | A_1) \quad \text{или} \quad P(A_1 \cdot A_2) = P(A_2) \cdot P(A_1 | A_2); \quad (12)$$

2) вероятность произведения произвольного числа событий:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_1 | A_2) \cdot \dots \times \\ \times P(A_n | A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_{n-1}); \quad (13)$$

3) вероятность произведения двух независимых событий:

$$P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2); \quad (14)$$

4) вероятность произведения произвольного числа независимых событий:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i); \quad (15)$$

4) вероятность произведения несовместных событий, составляющих полную совокупность:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(e) = 0. \quad (16)$$

Формула полной вероятности. Если событие A_0 может наступить лишь при условии появления одного из несовместных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$, то его вероятность равна:

$$P(A_0) = P(A_1) \cdot P(A_0 | A_1) + P(A_2) \cdot P(A_0 | A_2) + \dots + \\ + P(A_n) \cdot P(A_0 | A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(A_0 | A_i). \quad (17)$$

В теории надёжности противоположными несовместными событиями являются *вероятность безотказной работы* и *вероятность отказа* объекта. Для обозначения вероятности безотказной работы объекта в пределах заданной наработки t (вероятность события $A - P(A)$) принято использовать обозначение P , а для обозначения вероятности отказа объекта (вероятность события, противоположного $A - P(\bar{A})$) – Q . Здесь и далее в аргумент t , показывающий зависимость показателей надёжности от времени (наработки) с целью упрощения математических формул опущен.

3.2 Расчёт надёжности систем с последовательным соединением элементов

Если $p_1, p_2, p_3 \dots p_i$ – вероятности безотказной работы элементов, входящих в систему (см. рис. 1), то алгебраическая вероятность безотказной работы этой системы P за время t может быть подсчитана по теореме умножения вероятностей – вероятность совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий (формула (14)):

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_i = \prod_{i=1}^n p_i.$$

Т.к. вероятность несовместных событий составляют полную группу (формула (11)), т.е. $P + Q = 1$, то вероятность отказа этой же системы Q за время t будет равна:

$$Q = 1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_i = 1 - \prod_{i=1}^n p_i.$$

В случае если вместо вероятностей безотказной работы элементов p за время t известны вероятности их отказов q за тоже время t , то выражения можно представить в следующем виде:

$$P = (1 - q_1) \cdot (1 - q_2) \cdot (1 - q_3) \cdot \dots \cdot (1 - q_i) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i);$$

$$Q = 1 - (1 - q_1) \cdot (1 - q_2) \cdot (1 - q_3) \cdot \dots \cdot (1 - q_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i),$$

а в случае если все элементы в системе равнонадёжные, т.е. обладают одинаковой надёжностью $p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_i$ за время t , то получим:

$$P = p_i^n = (1 - q_i)^n;$$

$$Q = 1 - p_i^n = 1 - (1 - q_i)^n,$$

где n – количество элементов в системе.

Пример. Техническая система состоит из 4-х последовательно соединённых элементов (рис. 7), которые в случае *а* имеют вероятности безотказной работы $p_1 = 0,95$, $p_2 = 0,90$, $p_3 = 0,85$, $p_4 = 0,80$; в случае *б* – $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0,90$. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы P и вероятность отказа системы Q за время t в вариантах *а* и *б*.

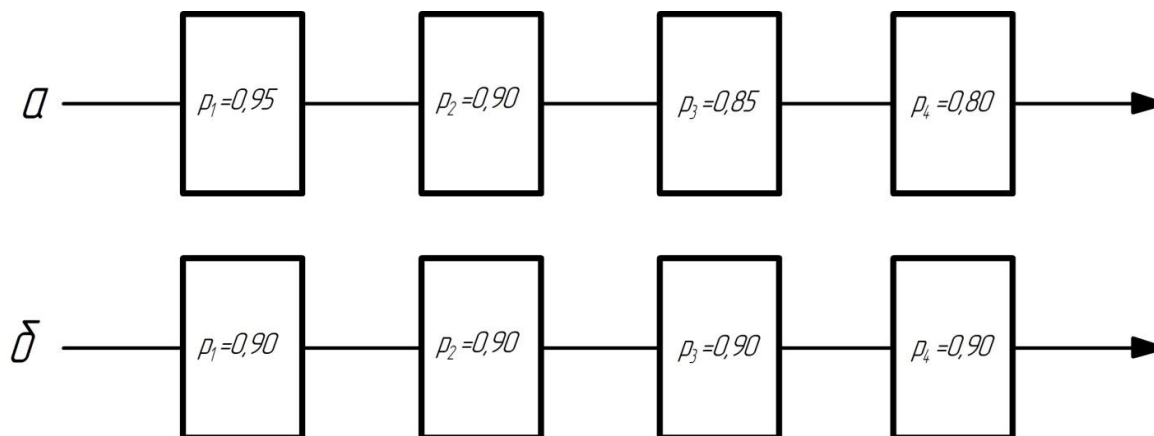


Рис. 7. Четырёхэлементная схема с последовательным соединением

Для случая *а*, когда элементы неравнонадёжные, значения вероятности безотказной работы системы P и вероятности отказа системы Q за время t составят:

$$P = 0,95 \cdot 0,90 \cdot 0,85 \cdot 0,80 = 0,5814;$$

$$Q = 1 - 0,95 \cdot 0,90 \cdot 0,85 \cdot 0,80 = 1 - 0,5814 = 0,4186.$$

Для случая *б*, когда элементы равнонадёжные, искомые показатели составят:

$$P = 0,90^4 = 0,6561.$$

$$Q = 1 - 0,90^4 = 1 - 0,6561 = 0,3439.$$

В результате произведённых расчётов получено, что вероятность безотказной работы P и вероятность отказа Q системы за время t соответственно для варианта *а* составляют 0,5814 и 0,4186, для варианта *б* – 0,6561 и 0,3439.

Таким образом, надёжность системы с последовательным соединением элементов ниже надёжности самого ненадёжного элемента данной систе-

мы. Наиболее простым решением повышения надёжности системы является повышение вероятности безотказной работы тех её элементов, отказы которых приводят к отказу всей системы. Это возможно, например, за счёт создания рациональных конструкций элементов, применения коррозионно стойких к агрессивным средам материалов, совершенствования организации технологических процессов их изготовления, монтажа и т.д.

3.3 Расчёт надёжности систем с параллельным соединением элементов

Если $q_1, q_2, q_3 \dots q_i$ – вероятности отказов элементов, входящих в систему (см. рис. 2), то алгебраическая вероятность отказа этой системы Q за время t может быть подсчитана по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказов этих элементов за тоже время t :

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot \dots \cdot q_i(t) = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Т.к. вероятность несовместных событий составляют полную группу (формула (11)), т.е. $P + Q = 1$, то вероятность безотказной работы P этой же системы за время t будет равна:

$$P = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot \dots \cdot q_i = 1 - \prod_{i=1}^n q_i.$$

В случае если вместо вероятностей отказов элементов q за время t известны вероятности их безотказной работы p за тоже время t , то выражения можно представить в следующем виде:

$$Q = (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_i) = \prod_{i=1}^n (1 - p_i);$$

$$P = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i),$$

а в случае если все элементы в системе равнонадёжные, соответственно

обладают одинаковой вероятностью отказа $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_i$ за время t , то получим:

$$Q = q_i^n = (1 - p_i)^n;$$

$$P = 1 - q_i^n = 1 - (1 - p_i)^n,$$

где n – количество элементов в системе.

Пример. Техническая система состоит из 4-х параллельно соединённых элементов (рис. 8), которые в случае *a* имеют вероятности безотказной работы $p_1 = 0,95$, $p_2 = 0,90$, $p_3 = 0,85$, $p_4 = 0,80$; в случае *б* – $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0,90$. Необходимо определить вероятность безотказной работы P и вероятность отказа системы Q за время t в вариантах *a* и *б*.

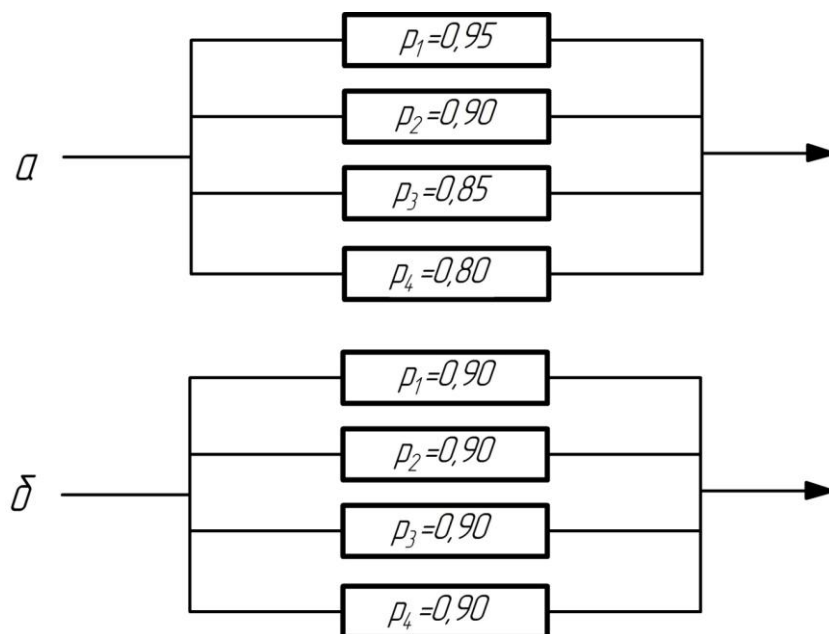


Рис. 8. Четырёхэлементная схема с параллельным соединением

Для случая *a*, когда элементы неравнонадёжные, значения вероятности безотказной работы системы P и вероятности отказа системы Q за время t составят:

$$P = 1 - (1 - 0,95) \cdot (1 - 0,90) \cdot (1 - 0,85) \cdot (1 - 0,80) = 0,99985;$$

$$Q = (1 - 0,95) \cdot (1 - 0,90) \cdot (1 - 0,85) \cdot (1 - 0,80) = 1 - 0,99985 = 0,00015.$$

Для случая *б*, когда элементы равнонадёжные, искомые показатели составят:

$$P = 1 - (1 - 0,90)^4 = 0,9999.$$

$$Q = (1 - 0,90)^4 = 1 - 0,9999 = 0,0001.$$

В результате произведённых расчётов получено, что вероятность безотказной работы *P* и вероятность отказа *Q* системы за время *t* соответственно для варианта *а* составляют 0,99985 и 0,00015, для варианта *б* – 0,9999 и 0,0001.

Таким образом, надёжность системы с параллельным соединением элементов значительно выше надёжности отдельного элемента этой системы. Причём надёжность системы увеличивается с увеличением числа элементов в этой системе. Это свойство позволяет из малонадёжных элементов создать достаточно надёжные системы.

3.4 Расчёт надёжности систем методом прямого перебора

Метод прямого перебора заключается в рассмотрении всех возможных сочетаний работоспособных и неработоспособных состояний системы. Рассмотрим данный метод на примере мажоритарной системы типа «2 из 5» (см. рис. 4). Для нормального функционирования системы типа «2 из 5» необходимо чтобы в работоспособном состоянии находились не менее двух элементов.

Количество всех возможных состояний системы *N* определяется по формуле:

$$N = 2^n, \tag{18}$$

где *n* – количество элементов в системе.

Для системы типа «2 из 5» по формуле (18) имеем:

$$N = 2^5 = 32.$$

Далее составляется расчётная таблица (табл. 3), в которой:

Таблица 3

Таблица для определения надёжности системы типа «2 из 5»
(при условии равнонадёжных элементов системы)

№ состояния	Состояние элементов					Состояние системы	Формула системы
	1	2	3	4	5		
1	2					3	4
1	1	1	1	1	1	1	p^5
2	1	1	1	1	0	1	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	1	1	1	0	1	1	
4	1	1	0	1	1	1	
5	1	0	1	1	1	1	
6	0	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	0	0	1	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	1	1	0	1	0	1	
9	1	0	1	1	0	1	
10	0	1	1	1	0	1	
11	1	1	0	0	1	1	
12	1	0	1	0	1	1	
13	0	1	1	0	1	1	
14	1	0	0	1	1	1	
15	0	1	0	1	1	1	
16	0	0	1	1	1	1	
17	1	1	0	0	0	1	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	1	0	1	0	0	1	
19	0	1	1	0	0	1	
20	1	0	0	0	1	1	
21	0	1	0	0	1	1	
22	0	0	0	1	1	1	
23	1	0	0	1	0	1	
24	0	1	0	1	0	1	
25	0	0	1	0	1	1	
26	0	0	1	1	0	1	
27	1	0	0	0	0	0	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
28	0	1	0	0	0	0	
29	0	0	1	0	0	0	
30	0	0	0	1	0	0	
31	0	0	0	0	1	0	
32	0	0	0	0	0	0	$q^5 = (1-p)^5$

- колонка 1 – номер состояния системы;
- колонка 2 – сочетания состояний элементов (работоспособное или неработоспособное) системы;
- колонка 3 – состояние системы (работоспособное или неработоспособное);
- колонка 4 – расчётная формула для определения вероятности безотказной работы системы для каждого случая сочетания элементов.

Для обозначения состояний элементов и системы используется двоичная система: 1 – работоспособное состояние, 0 – неработоспособное состояние.

Состояние системы в каждом случае определяется количеством работоспособных или неработоспособных элементов и условием работы. Вероятность любого состояния определяется произведением вероятностей состояний, в которых находятся данные элементы системы.

Например, для состояния системы № 7 элементы 1, 2 и 3 находятся в работоспособном состоянии, а элементы 4 и 5 – в неработоспособном состоянии. Следовательно, условие работы «2 из 5» сохраняется, и система находится в работоспособном состоянии. Вероятность такого состояния будет равна: $P_7 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot (1 - p_4) \cdot (1 - p_5)$, или при условии равнонадёжных элементов – $P_7 = p^3 \cdot q^2 = p^3 \cdot (1 - p)^2$.

С учётом всех возможных состояний системы вероятность безотказной работы находится суммированием всех работоспособных сочетаний:

$$P = p^5 + 5 \cdot p^4 \cdot q + 10 \cdot p^3 \cdot q^2 + 10 \cdot p^2 \cdot q^3;$$

$$P = p^5 + 5 \cdot p^4 \cdot (1 - p) + 10 \cdot p^3 \cdot (1 - p)^2 + 10 \cdot p^2 \cdot (1 - p)^3.$$

Если принять вероятность безотказной работы каждого элемента равной 0,9, тогда вероятность безотказной работы всей системы будет равна:

$$P = 0,9^5 + 5 \cdot 0,9^4 \cdot (1 - 0,9) + 10 \cdot 0,9^3 \cdot (1 - 0,9)^2 + 10 \cdot 0,9^2 \cdot (1 - 0,9)^3 = 0,99954.$$

С учётом того, что работоспособное и неработоспособное состояния образуют полную группу, т.е. $P = 1 - Q$, вероятность безотказной работы

системы можно определить следующим образом:

$$Q = 5 \cdot p \cdot q^4 + q^5 = 5 \cdot p \cdot (1 - p)^4 + (1 - p)^5.$$

Подставив принятое значение вероятности безотказной работы элементов в уравнение отказа системы, получим соответственно вероятность отказа системы:

$$Q = 5 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0,9)^4 + (1 - 0,9)^5 = 0,00046,$$

или вероятность безотказной работы системы:

$$P = 1 - 0,00046 = 0,99954.$$

Таким образом, полученные разными способами значения вероятности безотказной работы системы идентичны, однако можно сделать следующий вывод: для упрощения расчётов оценку вероятности безотказной работы системы необходимо проводить по меньшему количеству её состояний.

3.5 Расчёт надёжности систем комбинаторным методом

Комбинаторный метод основан на законе биномиального распределения:

$$P_m = c_n^m \cdot p^m \cdot (1 - p)^{n-m}, \quad (19)$$

где c_n^m – биномиальный коэффициент (количество сочетаний по m из n):

$$c_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (20)$$

n, m – соответственно количество элементов в системе и элементов находящихся в работоспособном состоянии.

Для определения вероятности безотказной работы системы необходимо найти сумму вероятностей, обеспечивающие её работоспособное состояние, т.е.:

$$P = P_m + P_{m+1} + \dots + P_{n-2} + P_{n-1} + P_n = \sum_{i=m}^n P_i. \quad (21)$$

С учётом формул (19) и (21) итоговое выражение для определения надёжности системы примет вид:

$$P = c_n^m \cdot p^m \cdot (1-p)^{n-m} + c_n^{m+1} \cdot p^{m+1} \cdot (1-p)^{n-m-1} + \\ + \dots + c_n^{n-1} \cdot p^{n-1} \cdot (1-p) + c_n^n \cdot p^n \cdot (1-p)^0;$$

или

$$P = \sum_{i=m}^n c_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}. \quad (22)$$

В качестве примера рассмотрим систему типа «2 из 5» (см рис. 4), которая состоит из равнонадёжных элементов с показателем надёжности 0,9.

Для того чтобы система типа «2 из 5» находилась в работоспособном состоянии необходимо, чтобы работоспособными оставались как минимум 2 элемента, т.е. логически возможно 4-е состояния системы при которых она будет функционировать: при нахождении в работоспособном состоянии 2-х, 3-х, 4-х и 5-и элементов системы.

Тогда формула надёжности системы запишется следующим образом:

$$P = c_5^2 \cdot p^2 \cdot (1-p)^{5-2} + c_5^3 \cdot p^3 \cdot (1-p)^{5-3} + \\ + c_5^4 \cdot p^4 \cdot (1-p)^{5-4} + c_5^5 \cdot p^5 \cdot (1-p)^{5-5};$$

Разложив биномиальные коэффициенты по формуле (20) и упростив выражение, получим:

$$P = 10 \cdot p^2 \cdot (1-p)^3 + 10 \cdot p^3 \cdot (1-p)^2 + 5 \cdot p^4 \cdot (1-p) + p^5,$$

или с учётом надёжности элементов:

$$P = 10 \cdot 0,9^2 \cdot (1-0,9)^3 + 10 \cdot 0,9^3 \cdot (1-0,9)^2 + \\ + 5 \cdot 0,9^4 \cdot (1-0,9) + 0,9^5 = 0,99954.$$

Аналогичным способом можно определить и вероятность отказа системы. В общем виде формулу для определения вероятности отказа системы можно записать следующим образом:

$$Q = \sum_{i=0}^{m-1} c_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}. \quad (23)$$

Логически система типа «2 из 5» будет неработоспособна в случаях, если откажут все элементы или работоспособным останется один. Тогда формула записи вероятности отказа системы типа «2 из 5» примет вид:

$$Q = c_5^1 \cdot p^1 \cdot (1-p)^{5-1} + c_5^0 \cdot p^0 \cdot (1-p)^{5-0} = 5 \cdot p \cdot (1-p)^4 + (1-p)^5,$$

или с учётом надёжности элементов:

$$Q = 5 \cdot 0,9 \cdot (1-0,9)^4 + (1-0,9)^5 = 0,00046.$$

3.6 Расчёт надёжности систем с использованием логико-вероятностных методов

Расчёт структурной надёжности технических систем с использованием логико-вероятностных методов основан на теории алгебры логики. Метод применим к системам с различными связями и сочетаниями элементов. Применение этого метода сводится к составлению формулы алгебры логики (ФАЛ), которая определяет условие работоспособности системы. При этом для каждого элемента рассматриваются два противоположных несовместимых события – состояние отказа $\bar{a}_i$ и состояние работоспособности a_i . Функции составляются с использованием знаков операции конъюнкция или логическое умножение (обозначается $\wedge$, читается «и») и дизъюнкция или логическое сложение (обозначается $\vee$, читается «или»).

Для мостиковой схемы с 5-ю элементами (см. рис. 5) функция работоспособности и неработоспособности запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} A &= a_1 \wedge a_4 \vee a_2 \wedge a_5 \vee a_1 \wedge a_3 \wedge a_5 \vee a_2 \wedge a_3 \wedge a_4 = \\ &= a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \vee \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 = \\ &= \bar{a}_1 \bar{a}_2 + \bar{a}_4 \bar{a}_5 + \bar{a}_1 \bar{a}_3 \bar{a}_5 + \bar{a}_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4. \end{aligned}$$

Для расчёта вероятности безотказной работы необходимо от логических функций посредством теорем сложения, формула (8), и умножения,

формула (15), вероятностей независимых событий (см. § 3.1) перейти к вероятностным функциям $P = P(A)$ или $Q = P(\bar{A})$:

$$P = P(A) = 1 - [1 - P(a_1 a_4)] \cdot [1 - P(a_2 a_5)] \cdot [1 - P(a_1 a_3 a_5)] \times \\ \times [1 - P(a_2 a_3 a_4)] = 1 - [1 - p(a_1)p(a_4)] \cdot [1 - p(a_2)p(a_5)] \times \\ \times [1 - p(a_1)p(a_3)p(a_5)] \cdot [1 - p(a_2)p(a_3)p(a_4)],$$

где $p(a_i) = p_i$, а также учитывая, что в алгебре логики $a_i \cdot a_i = a_i$, $p(a_i) \cdot p(a_i) = p(a_i \cdot a_i) = p(a_i)$, то после преобразований получим:

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - \\ - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

В случае $p_i = p$, т.е. равнонадёжных элементов системы:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Для получения формулы вероятности отказа аналогичные преобразования проводятся и для функции неработоспособности:

$$Q = P(\bar{A}) = 1 - [1 - P(\bar{a}_1 \bar{a}_2)] \cdot [1 - P(\bar{a}_4 \bar{a}_5)] \cdot [1 - P(\bar{a}_1 \bar{a}_3 \bar{a}_5)] \cdot [1 - P(\bar{a}_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4)] = \\ = 1 - [1 - p(\bar{a}_1)p(\bar{a}_2)] \cdot [1 - p(\bar{a}_4)p(\bar{a}_5)] \cdot [1 - p(\bar{a}_1)p(\bar{a}_3)p(\bar{a}_5)] \times \\ \times [1 - p(\bar{a}_2)p(\bar{a}_3)p(\bar{a}_4)],$$

где $p(\bar{a}_i) = 1 - p(a_i) = 1 - p_i = q_i$ – вероятность отказа i -го элемента, а также учитывая, что в алгебре логики $p(\bar{a}_i) \cdot p(\bar{a}_i) = p(\bar{a}_i \cdot \bar{a}_i) = p(\bar{a}_i)$, то после преобразований получим:

$$Q = q_1 q_2 + q_4 q_5 + q_1 q_3 q_5 + q_2 q_3 q_4 - q_1 q_2 q_3 q_4 - \\ - q_1 q_2 q_3 q_5 - q_1 q_2 q_4 q_5 - q_1 q_3 q_4 q_5 - q_2 q_3 q_4 q_5 + 2 q_1 q_2 q_3 q_4 q_5.$$

В случае $q_i = q$, т.е. равнонадёжных элементов системы:

$$Q = 2q^2 + 2q^3 - 5q^4 + 2q^5.$$

Логико-вероятностный метод используется для расчёта вероятности безотказной работы любых структурных схем надёжности. Однако получаемая логическая функция работоспособности не всегда соответствует структуре системы, при этом для систем с большим количеством элементов преобразования логических функций становятся очень громоздкими и трудоёмкими.

3.6.1 Метод логических схем

Для сокращения объёма преобразований при составлении логических функций зачастую используется метод логических схем. Логические схемы составляются с использованием методов минимальных путей и минимальных сечений на основе структурной схемы системы.

Минимальным путём (кратчайший путь успешного функционирования или минимальное проходное сочетание) называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает её работоспособность, а отказ любого из них приводит к её отказу.

Метод минимальных путей даёт точное значение только для сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем результат расчёта является нижней границей вероятности безотказной работы. Для расчёта верхней границы вероятности безотказной работы системы служит метод минимальных сечений.

Минимальным сечением (минимальное сечение отказов или минимальное аварийное сочетание) называется последовательный набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности системы.

Порядок составления логической функции методом минимальных путей и методом минимальных сечений проводится поэтапно.

1. Составляется логическая схема.

Логическая схема минимальных путей системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути параллельно.

Логическая схема минимальных сечений системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно.

2. В соответствии с общими правилами расчёта вероятности безотказной работы для логической схемы составляется логическая функция. При этом вместо символов вероятностей безотказной работы элементов p_i и системы P используются символы события – сохранения работоспособности элемента a_i и системы A .

3. Переменные a_i в логической функции рассматриваются как альтернативные (булевы), которые могут принимать только два значения: 0 или 1. Основным свойством булевы a_i является сохранения своего значения при возведении в любую степень k :

$$a_i^k = a_i. \quad (24)$$

4. После преобразования логической функции проводят замены символов событий элементов a_i и системы A соответствующими вероятностями безотказной работы элементов p_i и системы P .

5. По полученному уравнению, подставляя соответствующие количественные значения вероятностей безотказной работы элементов, определяют вероятность безотказной работы системы.

Рассмотрим метод логических схем на примере системы с мостиковой структурой соединения элементов (см. рис. 5).

Для мостиковой системы из пяти элементов имеется 4-е кратчайших последовательных набора работоспособных элементов, которые обеспечивают работоспособность всей системы, т.е. 4-е минимальных пути (рис. 5): 1-4, 2-5, 1-3-5, 2-3-4.

Отказ логической схемы состоит в одновременном отказе всех четырех параллельных ветвей, а безотказная работа каждой ветви – в одновременной безотказной работе её элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому умножению «И», параллельное – логическому сложению «ИЛИ». Итак, логическая схема на рис. 9. соответствует утверждению: система работоспособна, если работоспособны элементы 1 и 4, или 2 и 5, или 1,3 и 5, или 2, 3 и 4.

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Для той же системы из пяти элементов (см. рис. 5) имеется 4-е минимальных сечения (аварийных сочетаний элементов), которые приводят к отказу системы, при этом восстановление любого из этих элементов приводит к восстановлению работоспособности всей системы (рис. 10): 1-2, 4-5, 1-3-5, 2-3-4.

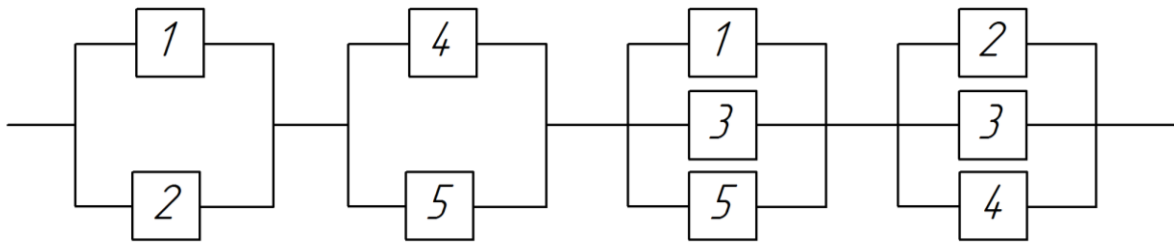


Рис. 10. Логическая схема минимальных сечений системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения

Безотказная работа логической системы (рис. 10) заключается в безотказной работе всех последовательных участков, а отказ каждого из них – в одновременном отказе всех параллельно включённых элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому сложению «ИЛИ», а параллельное – логическому умножению «И».

Итак, схема на рис. 10 соответствует утверждению: система откажет, если откажут элементы 1 и 2, или 4 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4.

Таким образом, логическая функция запишется:

$$A = [1 - (1 - a_1) \cdot (1 - a_2)] \cdot [1 - (1 - a_4) \cdot (1 - a_5)] \times \\ \times [1 - (1 - a_1) \cdot (1 - a_3) \cdot (1 - a_5)] \cdot [1 - (1 - a_2) \cdot (1 - a_3) \cdot (1 - a_4)];$$

Раскрыв скобки и проведя соответствующие преобразования с учётом свойства булевы $a_i^k = a_i$, получим следующую функцию:

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - \\ - a_1 a_2 a_4 a_5 - a_1 a_3 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5.$$

Проводим замену символов событий a_i и A соответствующими вероятностями безотказной работы элементов p_i и системы P :

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - \\ - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

Если в системе все элементы равнонадёжны, то итоговое выражение вероятности безотказной работы примет вид:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Таким образом, при небольшом количестве элементов в системе верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы одинаковы.

3.6.2 Метод разложения относительно особого элемента

Для анализа надёжности сравнительно простых систем целесообразно использовать метод разложения относительно особого элемента, который основан на теореме о разложении логической функции по любому аргументу:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (25)$$

где p_i и q_i – вероятности безотказной работы и отказа i -го элемента;

$P(p_i = 1)$ – вероятность работоспособного состояния системы при условии, что i элемент абсолютно надёжен;

$P(p_i = 0)$ – вероятность работоспособного состояния системы при условии, что i элемент отказал.

Рассмотрим данный метод на примере системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения (см. рис. 5).

В качестве особого элемента здесь целесообразно выбрать диагональный элемент 3. Предполагается, что элемент 3 может находиться в двух возможных состояниях – в абсолютно надёжном состоянии ($p_3 = 1$) и состоянии отказа ($p_3 = 0$):

$$P = p_3 P(p_3 = 1) + q_3 P(p_3 = 0) = p_3 P(p_3 = 1) + (1 - p_3) P(p_3 = 0).$$

При $p_3 = 1$ надёжность системы повысится, тогда логическая схема

рассматриваемой системы будет представлять собой параллельно-последовательное соединением элементов (рис. 11, а). При $p_3 = 0$ надёжность системы уменьшится, и, следовательно, логическая схема будет представлять собой последовательно-параллельным соединением элементов (рис. 11, б).

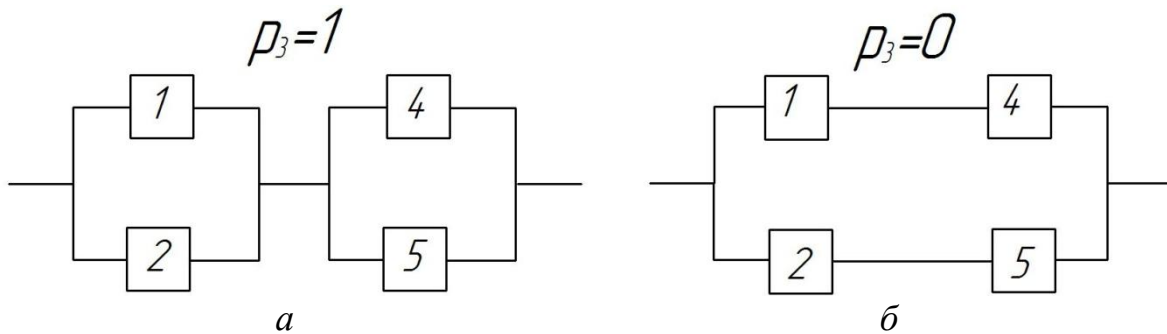


Рис. 11. Логические схемы системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения при её разложении относительно 3-го элемента

Для полученных логических схем с учётом общих правил теории надёжности можно записать следующие уравнения:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4) \cdot (1 - p_5)];$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4) \cdot (1 - p_2 p_5).$$

Таким образом, с учётом полученных уравнений, вероятность безотказной работы системы из 5-и элементов с мостиковой структурой по формуле (25) будет равна:

$$P = p_3 \cdot [1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4) \cdot (1 - p_5)] + (1 - p_3) \times \\ \times [1 - (1 - p_1 p_4) \cdot (1 - p_2 p_5)].$$

Раскрыв скобки и проведя соответствующие преобразования, получим следующее выражение:

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - \\ - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5;$$

или в случае равнонадёжных элементов:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

3.6.3 Метод дерева отказов

Метод дерева отказов отличается от других логико-вероятностных методов, основанных на индуктивных подходах, т.е. рассмотрении влияния каждого элемента на состояние системы в целом, использованием дедуктивного метода. Дедуктивный метод предполагает анализ неработоспособного состояния системы и причин, которые к нему приводят. Условия, при которых возникает отказ системы, сводится в логическую схему причинно-следственных связей отказов в виде ориентированного графа с ветвящейся структурой – *дерево отказов*. Структурные элементы дерева события связаны между собой логическими операциями.

На рисунке 12 показаны основные условные логические обозначения и элементы, используемые при построении дерева отказов:

а) результирующее или завершающее событие – отказ технической системы, анализ которого проводится;

б) промежуточное событие – сложное событие с логическим оператором, являющееся одной из возможных причин результирующего (завершающего) или другого промежуточного события более высокого уровня;

в) первичное или базовое событие (отказ элемента) – простое событие (отказ элемента), причины которого при построении дерева отказов не анализируются;

г) символ дизъюнкции (логическое «ИЛИ» – сложение) – обозначает наличие события на выходе при наличии хотя бы одного события на входе;

д) символ конъюнкции (логическое «И» – умножение) – обозначает наличие события на выходе только при наличии всех событий на входе.

При построении дерева отказов могут использоваться и другие условные логические обозначения и элементы, однако большинство из них можно заменить комбинацией операторов «И» и «ИЛИ».

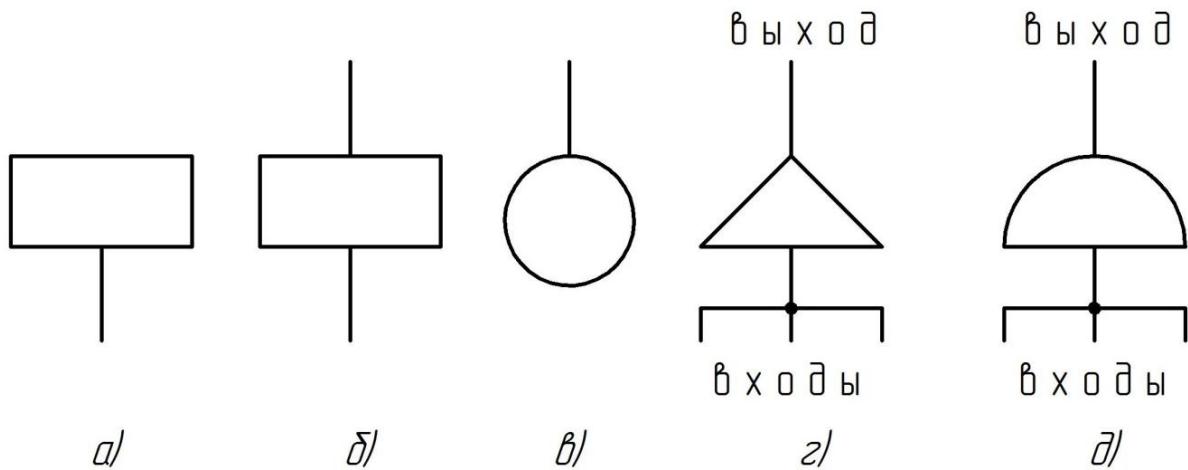


Рис. 12. Условные логические обозначения и элементы в деревьях отказов

Если у системы возможны несколько отказов разного вида (многофункциональные схемы), то для каждого из них строится своё дерево отказов.

Дерево отказов позволяет проводить качественный и количественный анализ надёжности систем. При качественном анализе определяются виды и причины отказов, степень защищённости системы от конкретных отказов, причины возникновения двух и более отказов разных видов, проводится ранжирование причин отказов по важности и т.д. Количественный анализ заключается в определении вероятностных количественных характеристик надёжности системы по вероятностным характеристикам элементов.

Рассмотрим данный метод на примере системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения (см. рис. 5). Отказ системы произойдёт при одновременном отказе элементов 1-2, 4-5, 1-3-5, 2-3-4. Следовательно, функция неработоспособности, как уже отмечалось ранее, запишется в виде:

$$\begin{aligned}\bar{A} &= A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 = \\ &= \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \vee \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 = \\ &= \bar{a}_1 \bar{a}_2 + \bar{a}_4 \bar{a}_5 + \bar{a}_1 \bar{a}_3 \bar{a}_5 + \bar{a}_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4.\end{aligned}$$

Дерево отказов для мостиковой схемы соответствующей функции неработоспособности показано на рисунке 13.

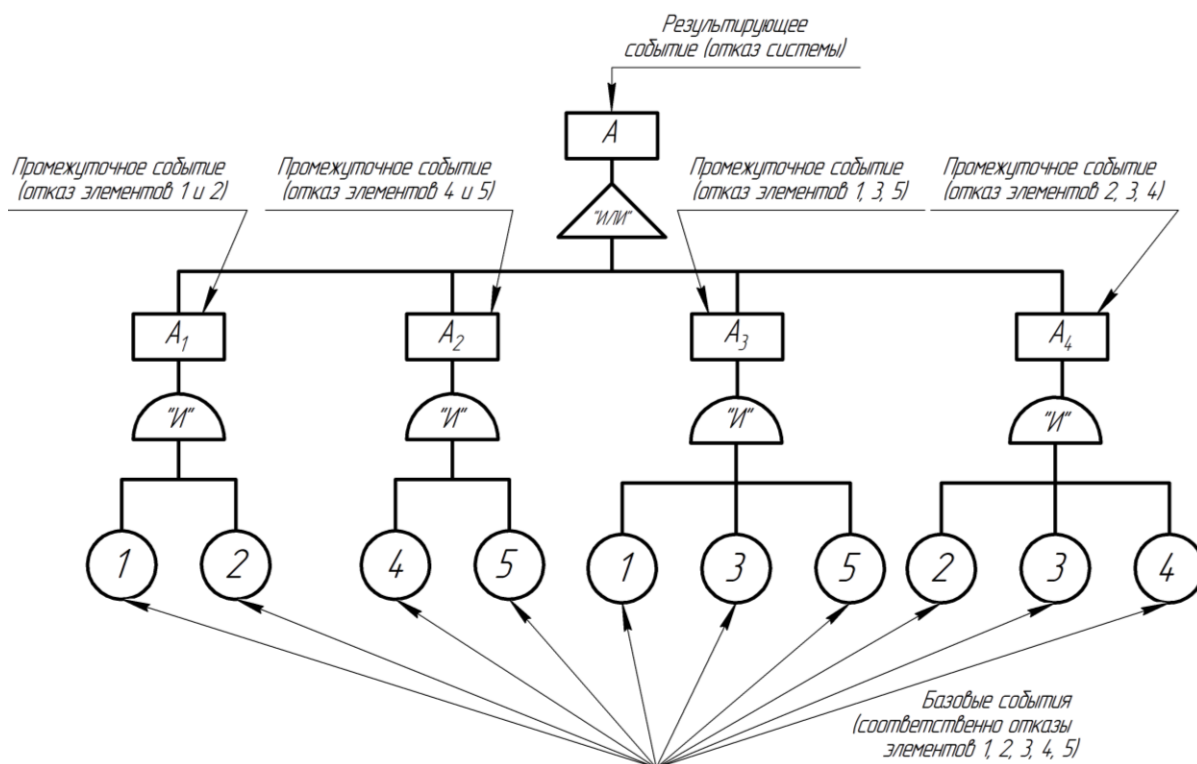


Рис. 13. Дерево отказов мостиковой системы с 5-ю элементами

Исходя из понятия полной совокупности событий, вместо дерева отказов можно составить *дерево работоспособности* или «дерево успехов». Для получения дерева работоспособности из дерева отказов необходимо заменить в нём все символы «ИЛИ» символами «И», все первичные и результирующие события заменить противоположными (дополнительными) событиями. По дереву работоспособности можно построить функцию работоспособности:

$$\begin{aligned}
 A &= A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 = \\
 &= a_1 \wedge a_4 \vee a_2 \wedge a_5 \vee a_1 \wedge a_3 \wedge a_5 \vee a_2 \wedge a_3 \wedge a_4 = \\
 &= a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4,
 \end{aligned}$$

и далее рассчитать вероятность безотказной работы системы изложенными выше методами.

Метод дерева отказов позволяет наглядно представить возможные причины возникновения отказов технических систем и определить способы повышения их надёжности. На использовании дерева отказов основана

значительная часть аналитических методов расчёта надёжности и анализа риска. Однако построение дерева отказов для больших сложных систем требует значительных затрат времени и средств, в связи с чем разработаны специальные методы автоматизированного построения, а также некоторые приёмы снижения сложности дерева отказов.

3.7 Расчёт надёжности комбинированных систем

Большинство систем, в том числе в химической и нефтехимической промышленности, имеют сложную комбинированную структуру. По своей сути такие системы представляет собой комбинацию элементов, соединённых то последовательно, то параллельно (рис. 14).

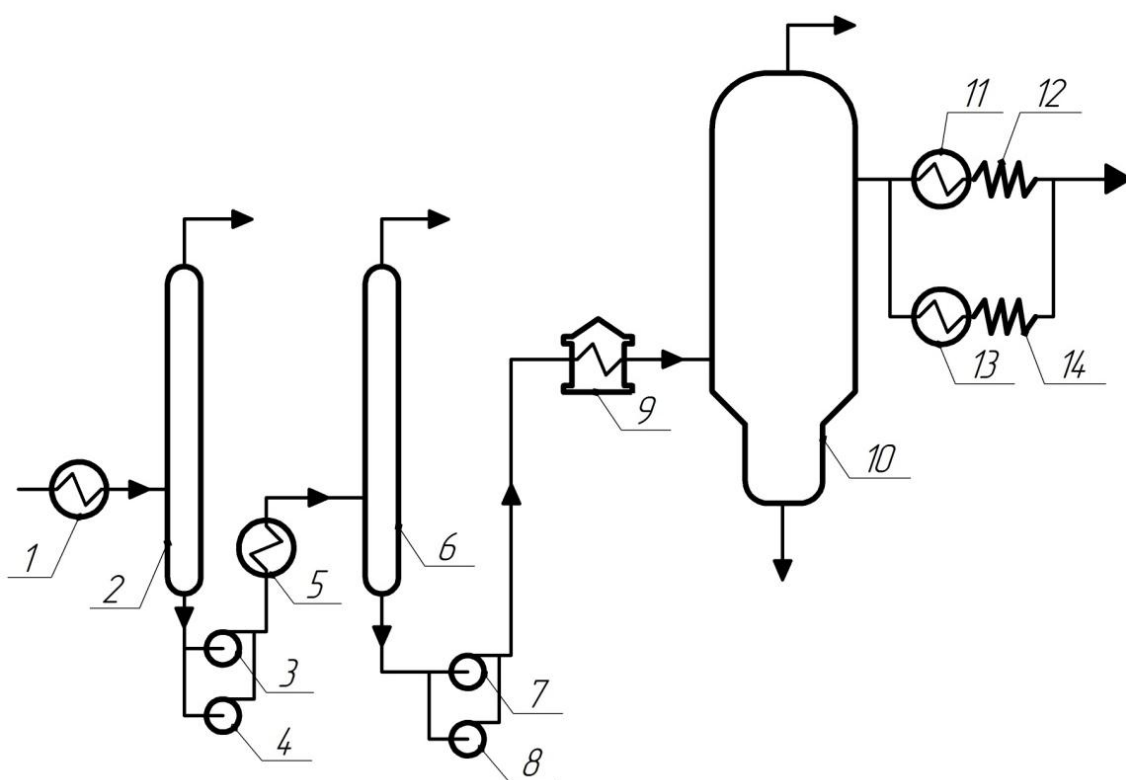


Рис. 14 Схема перегонки мазута на установке АВТ (позиции по тексту)

Задача определения надёжности системы такого типа заключается в её анализе, декомпозиции системы на модули (квазиэлементы), включающие элементы соединённые идентично, составление упрощённой структурной

схемы, определение показателей надёжности каждого квазиэлемента и системы в целом. При составлении структурной схемы в виде отдельных элементов (модулей) необходимо каждый раз при переходе от одного структурного элемента (модуля) к другому логически прогнозировать, что произойдёт с системой в целом, если откажет данный структурный элемент (модуль). Если отказ системы произойдёт, то данный структурный элемент (модуль) в смысле надёжности включён последовательно, если же нет – параллельно.

Пример. На рисунке 14 представлен фрагмент технологической схемы перегонки мазута установки АВТ. Нефть подаётся в теплообменник поз. 1, а далее поступает в колонну стабилизации поз. 2. Кубовый продукт (отбензиненная нефть) с температурой плюс 245 °С насосами поз. 3 и 4 подаётся в теплообменник поз. 5, где нагревается до плюс 385 °С. Нагретая нефть поступает в нижнюю часть колонны первичной перегонки бензина поз. 6.

Кубовый продукт (мазут) из колонны поз. 6 насосами поз. 7 и 8 подаётся в коллектор печи поз. 9, где нагревается до температуры плюс 430 °С.

Далее мазут поступает на четвёртую тарелку вакуумной колонны поз. 10. Вакуумный газойль из колонны поз. 10 в качестве продукта отводится через теплообменники поз. 11 и 13 и холодильники поз. 12 и 14 в накопитель.

Вероятность безотказной работы нефтехимического оборудования в течение 12-и часовой рабочей смены для насосов (поз. 3, 4, 7, 8) составляет 0,9928, для теплообменников и холодильников (поз. 1, 5, 11, 12, 13, 14) – 0,9990, для колонных аппаратов (поз. 2, 6, 10) – 0,9995, для печи (поз. 9) – 0,9904. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы P и вероятность отказа системы Q в течение рабочей смены.

Анализ технологической схемы позволил выделить модули с идентичным соединением элементов и произвести их замены на квазиэлементы. Насосы поз. 3 и 4 соединены между собой параллельно, объединим их в квазиэлемент A , насосы поз. 7 и 8 также соединены параллельно, объединим их в

квазиэлемент B . Теплообменник поз. 11 и холодильник поз. 12 соединены последовательно, обозначим их квазиэлементов B , аппараты поз. 13 и поз. 14 – также последовательно, обозначим их квазиэлементом Γ . В свою очередь квазиэлементы B и Γ соединены между собой параллельно. Таким образом, получили упрощённую структурную схему (рис. 15).

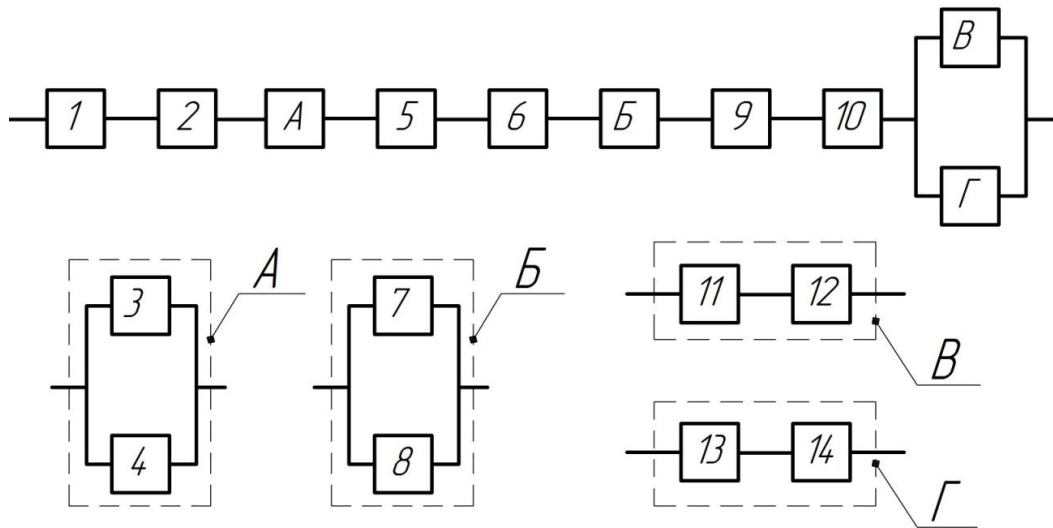


Рис. 15. Упрощённая структурная схема, соответствующая рисунку 14

Далее производим расчёт искомых показателей надёжности для квазиэлементов и системы в целом в соответствии с теоремой умножения вероятностей (формула (14)), а также понятием полной группы.

Т.к. $p_3 = p_4 = p_7 = p_8 = p_{AB} = 0,9982$, то получим:

$$P_A = P_B = 1 - (1 - p_{AB})^2 = 1 - (1 - 0,9982)^2 = 0,99995.$$

Т.к. $p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14} = p_{B\Gamma} = 0,9990$, то получим:

$$P_B = P_\Gamma = p_{B\Gamma}^2 = 0,9990^2 = 0,998.$$

$$P_c = p_1 p_2 P_A p_5 p_6 P_B p_9 p_{10} [1 - (1 - P_B) \cdot (1 - P_\Gamma)] = 0,990 \cdot 0,9995 \times \\ \times 0,99995 \cdot 0,990 \cdot 0,9995 \cdot 0,99995 \cdot 0,9904 \cdot 0,9995 \cdot [1 - (1 - 0,998)^2] = 0,969.$$

$$Q_c = 1 - P_c = 1 - 0,969 = 0,031.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ системы соответственно составляют 0,969 и 0,031.

4 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ

4.1 Методы повышения надёжности

Различают два основных метода повышения надёжности системы – повышение надёжности элементов системы и изменение структурной схемы.

Первый метод наиболее простой, однако реализация его на практике зачастую невозможна. Это обусловлено тем, что высоконадёжные элементы имеют большие габариты, массу, стоимость и т.п. В связи с чем перед модернизацией системы с целью повышения её надёжности, сначала необходимо соотнести возможный полезный эффект от повышения надёжности с затратами на его осуществление. Исключение составляет использование более совершенной элементной базы, реализуемой на принципиально новых физических и технологических принципах.

Второй метод (изменение структурной схемы) предполагает перестройку конструктивной или функциональной схемы, а также изменение принципов функционирования отдельных модулей системы (например, переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой). Однако такой способ повышения надёжности системы имеет ограниченное применение и возможно лишь в исключительных случаях.

Наиболее распространённый способ изменения структуры системы предполагает *резервирование* – введение дополнительных (избыточных) средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких элементов. К дополнительным средствам и возможностям относятся функциональные, алгоритмические, программные и информационные резервы, использование избытка времени, запасов нагрузочной способности и т.д., а также введение в структуру схемы резервных элементов.

4.2 Классификация способов и видов резервирования

Классификация способов и видов резервирования производится в зависимости от вида избыточности.

Временное резервирование – (с применением резервов времени) реализуется путём:

- 1) увеличения расчётного времени функционирования для выполнения поставленной задачи или выпуска заданного количества продукции;
- 2) разработкой оборудования на большее, чем расчётное, значение производительности;
- 3) введения в структуру системы промежуточных накопителей;
- 4) обеспечения функциональной инерционности элементов системы.

Временное резервирование может обеспечить безостановочную работу системы при отказе некоторых элементов на время, необходимое для восстановления (замены). Не изменяя вероятности безотказной работы, временное резервирование улучшает комплексные показатели надёжности.

Информационное резервирование (с применением резервов информации) используется в объектах, в которых возникновение отказа приводит к потере или искажению обрабатываемой или передаваемой информации (системы контроля, управления, вычислительная техника и т.д.).

Используются следующие приемы информационного резервирования:

- 1) многократная передача информации по одному каналу;
- 2) параллельная передача информации по нескольким каналам;
- 3) замена полной информации кодированной.

Функциональное резервирование предусматривает использование способности элементов выполнять дополнительные избыточные функции (например, резервирование нескольких специализированных станков одним универсальным).

Нагрузочное резервирование заключается в обеспечении оптимальных за-

пасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки или введении в объект дополнительных защитных или разгружающих элементов для защиты основных элементов от нагрузок (например, использование коэффициентов запаса прочности, использование предохранительных устройств).

Структурное резервирование (с применением резервных элементов) осуществляется путём введения в структуру объекта дополнительных элементов, выполняющих функции основных в случае их отказа.

Способы структурного резервирования классифицируют по следующим признакам:

1) по схеме включения резерва:

- общее резервирование, при котором резервируется объект в целом;
- раздельное резервирование, при котором резервируются отдельные элементы или их группы;

2) по однородности резервирования:

- однородное резервирование, при котором используется один способ резервирования;
- смешанное резервирование, при котором сочетаются различные виды резервирования;

3) по способу включения резерва:

- постоянное резервирование, при котором при отказе элемента перестройки структуры системы не происходит;
- динамическое резервирование, при котором при отказе элемента происходит перестройка структуры системы;
- резервирование замещением, при котором функции основного элемента передаются резервному после отказа основного;
- скользящее резервирование, при котором несколько основных элементов резервируются одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной;

– фиксированное резервирование, при котором каждый резервный элемент закреплён за одним из основных;

4) по восстановлению работоспособности отказавших элементов:

– резервирование с восстановлением (восстанавливаемый резерв), при котором работоспособность отказавших резервных элементов восстанавливается без прекращения функционирования всей системы;

– резервирование без восстановления (не восстанавливаемый резерв), при котором работоспособность элементов не восстанавливается;

5) по состоянию резерва:

– нагруженное («горячее») резервирование (нагруженный резерв), при котором резервные элементы находятся в режиме основного элемента;

– облегченное («теплое») резервирование (облегченный резерв), при котором резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основным;

– ненагруженное («холодное») резервирование (ненагруженный резерв), при котором резервные элементы до начала выполнения ими функций основного элемента находятся в ненагруженном режиме.

4.3 Понятие кратность резервирования и коэффициент выигрыша надёжности

Основной характеристикой структурного резервирования является *кратность резервирования* – отношение числа резервных элементов к числу основных, выраженное несокращённой дробью. Резервирование одного основного элемента одним резервным (с кратностью 1:1) называется *дублированием*.

Число кратности резервирования:

$$h = \frac{m - r}{r}, \quad (26)$$

где m – общее число элементов в системе;

r – число элементов, необходимое для нормальной работы системы.

Значение h может быть целым, если $r = 1$, и дробным, если $r > 1$. Скользящее резервирование является разновидностью с дробной кратностью.

В общем случае при выборе элемента (или группы элементов) для повышения надёжности или резервирования системы необходимо исходить из условия обеспечения максимального эффекта. В качестве критерия эффективности могут использоваться конструктивные, технологические, производственные или экономические показатели, а также показатели надёжности.

Эффективность модернизации системы оценивается по *коэффициенту выигрыша надёжности* – отношение значений показателей надёжности до и после преобразования, например:

$$G_P = \frac{P_p}{P}; \quad G_\tau = \frac{\tau_p}{\tau}; \quad G_q = \frac{q_p}{q}; \quad G_T = \frac{T_p}{T}; \quad G_\lambda = \frac{\lambda_p}{\lambda}; \quad G_{K\gamma} = \frac{K\gamma_p}{K\gamma}, \quad (27)$$

где $G_P, G_\tau, G_q, G_T, G_\lambda, G_{K\gamma}$ – выигрыш надёжности соответственно по вероятности безотказной работы, наработки на отказ, вероятности отказа, по среднему времени безотказной работы, интенсивности отказов, коэффициенту простоя;

$P_p, \tau_p, q_p, T_p, \lambda_p, K\gamma_p$ – соответственно вероятность безотказной работы, наработка на отказ, вероятность отказа, среднее время безотказной работы, интенсивность отказов, коэффициент простоя после резервирования системы;

$P, \tau, q, T, \lambda, K\gamma$ – соответственно вероятность безотказной работы, наработка на отказ, вероятность отказа, среднее время безотказной работы, интенсивность отказов, коэффициент простоя до резервирования системы.

Эффективность тем больше, чем меньше надёжность резервируемого элемента, т.е. при структурном резервировании максимального эффекта можно добиться при резервировании самых ненадёжных элементов (или групп элементов).

Например, для системы из n последовательно соединённых элементов

после резервирования одного из элементов (k -го) аналогичным по надёжности элементом коэффициент выигрыша надёжности по вероятности безотказной работы составит:

$$G_p = \frac{P_p}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k,$$

т.е. эффективность резервирования тем больше, чем меньше надёжность элементов (при $p_k = 0,9 \rightarrow G_p = 1,1$, при $p_k = 0,5 \rightarrow G_p = 1,5$). Следовательно, при структурном резервировании максимального эффекта можно добиться при резервировании в первую очередь самых ненадёжных элементов (или групп элементов).

4.4 Надёжность систем с резервированием

Расчёт систем с *нагруженным резервированием* без восстановления производится по формулам последовательного и параллельного соединений элементов аналогично расчёту комбинированных систем. При этом считается, что отказ резервной группы, состоящей из основного и резервных элементов, произойдет тогда, когда откажет её последний элемент, и резервные элементы работают в режиме основных как до, так и после их отказа, поэтому надёжность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного в основное состояние.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа j -ой цепи и в целом системы с последовательным соединением n элементов и m цепей при общем резервировании (рис. 15, а) запишутся в виде:

$$P_j = \prod_{i=1}^n p_{ij}; \quad Q_j = 1 - P_j = 1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}; \quad P_{op} = 1 - \prod_{j=0}^m \left[1 - \prod_{i=1}^n p_{ij} \right]. \quad (28)$$

При раздельном резервировании для i -ой группы (рис. 15, б):

$$Q_i = \prod_{j=1}^m q_{ij}; \quad P_i = 1 - Q_i = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_{ij}]; \quad P_{pp} = \prod_{i=1}^n [1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ij})]. \quad (29)$$

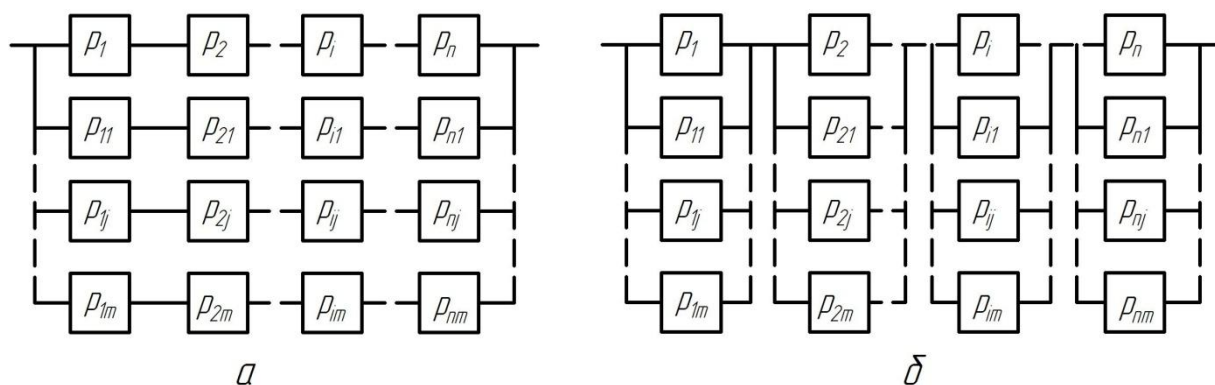


Рис. 15. Общее (а) и раздельное (б) нагруженное резервирование

Если резервные и основные элементы равнонадёжны, то для системы с последовательным соединением n элементов при общем и раздельном резервировании с кратностью l , формулы (28) и (29) можно представить в виде:

$$P_{op} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i \right)^{l+1} ; \quad P_{pp} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)]^{l+1}.$$

Ненагруженное резервирование встречается более распространено, т.к. оно аналогично замене отказавших элементов на запасные. При *ненагруженном резервировании* (резервировании замещением) резервные элементы включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и т.д. (рис. 16), поэтому надёжность элементов в каждый момент времени зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное. При этом считается, что замена отказавшего элемента резервным происходит мгновенно, отказ системы произойдет тогда, когда откажет последний элемент.

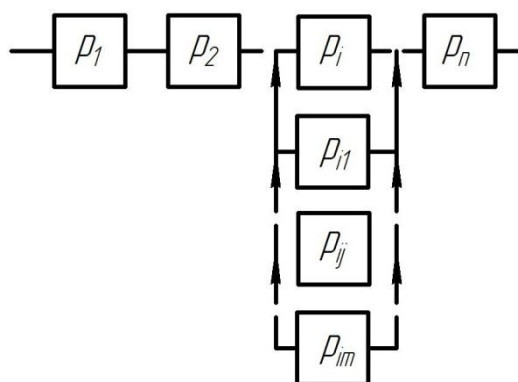


Рис. 16. Ненагруженное резервирование (резервирование замещением)

Если элементы до включения абсолютно надёжны, то для системы с кратностью l (всего элементов $l + 1 = m$ – см. рис. 16) вероятность безотказной работы будет равна:

$$P_{pz} = 1 - \frac{1}{m!} \prod_{i=1}^m (1 - p_i). \quad (30)$$

Облегченное резервирование используется в системах при большой инерционности переходных процессов (из резервного в основной режим), происходящих в элементе, и нецелесообразности применения нагруженного резервирования из-за недостаточного выигрыша в надёжности. Считается, что замена отказавшего элемента резервным происходит мгновенно, отказ резервной группы произойдёт тогда, когда откажет её последний элемент. Облегченный резерв занимает промежуточное положение между нагруженным и ненагруженным.

Точные формулы для расчёта надёжности системы при облегчённом резервировании даже с идеальными переключателями довольно громоздки и приводятся в специальной литературе, например [7].

Скользящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых (или взаимозаменяемых) элементов системы одним или несколькими резервными (рис. 17), причём резервирование может быть как нагруженным, так и ненагруженным. Отказ системы произойдет, если число отказавших основных элементов превысит число резервных.

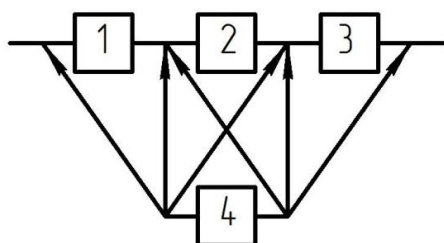


Рис. 17. Скользящее резервирование

При *нагруженном скользящем резервировании* с идеальными переключателями расчёт надёжности системы аналогичен расчёту мажоритар-

ных систем (типа « m из n »). Если интенсивности отказов основных и резервных элементов постоянны и одинаковы, то вероятность безотказной работы системы, содержащей n основных и k резервных элементов, в режиме нагруженного резерва можно определить по формуле:

$$P_{cp} = \sum_{m=0}^k C_{n+k}^m p^{n+k-m} (1-p)^m, \quad (31)$$

где C_{n+k}^m – биномиальный коэффициент.

n, k, m – соответственно количество основных и резервных элементов в системе и элементов находящихся в работоспособном состоянии.

При *ненагруженном скользящем резервировании* в общем случае характеристики надёжности системы выражаются громоздкими формулами и приводятся в специальной литературе, например [7].

4.5 Оптимизация структурного резервирования

Уже отмечалось, что перед модернизацией системы с целью повышения её надёжности, сначала необходимо соотнести возможный полезный эффект от повышения надёжности с затратами на его осуществление. Поэтому задача оптимизации структурного резервирования сводится к достижению максимально возможной надёжности системы при минимальных или предельно допустимых затратах. Различают *прямую и обратную оптимизационные задачи*, которые соответственно сводятся к определению числа резервных элементов, обеспечивающих заданную надёжность системы при минимальном расходе ресурсов и максимальную надёжность системы при ограниченном расходе ресурсов. В качестве показателей надёжности могут использоваться вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, средняя наработка и другие характеристики, а в качестве ресурса – стоимость, масса, габаритные размеры, число элементов.

Для решения оптимизационных задач применяются различные методы:

простого перебора, неопределённых множителей Лагранжа, градиентные (наискорейшего покоординатного спуска), максимального элемента, динамического программирования, ветвей и границ и др., которые подробно также рассмотрены в специальной литературе, например [7].

Метод простого перебора сводится к расчёту и сравнению друг с другом всех возможных в рамках наложенных ограничений вариантов резервирования, из которых затем выбирается оптимальный. При большом числе вариантов и для схем со сложной структурой и большим количеством элементов этот метод становится трудоёмким с большим объёмом вычислений.

Метод неопределённых множителей Лагранжа при решении задач структурной оптимизации достаточно прост и удобен. Однако в более сложных случаях (например, при ненагруженном или облегченном резервировании, при наличии нескольких ограничений и т.д.) его использование не всегда позволяет найти аналитическое решение и поэтому для этого часто приходится использовать численные методы, из-за чего преимущества метода множителей Лагранжа теряются.

Градиентный метод (методом наискорейшего покоординатного спуска) в сравнении с методами, рассмотренными выше, отличается большей приспособленностью для нахождения целочисленных решений и использованию средств вычислительной техники. Нахождение оптимальной структуры резервированной системы по градиентному методу представляет собой многошаговый процесс, на каждом шаге которого добавляется резервный элемент, который обеспечит наибольшее удельное приращение надёжности в расчете на единицу затрат. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое значение показателя надёжности (при решении прямой задачи оптимизации), или не будет достигнута предельная стоимость технической системы (при решении обратной задачи оптимизации).

Модификацией градиентного метода является метод *максимального элемента*, который используется при решении комплексных задач оптимизации показателей надёжности сложных систем.

5 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС

Необходимо определить вероятность безотказной работы P и вероятность отказа Q системы, в соответствии с вариантом задания (*приложения А и В*), при условии, что вероятность безотказной работы i -го элемента равна p_i , а вероятность отказа – q_i . На схемах, обведённые пунктиром m элементы являются функционально необходимыми из n параллельных ветвей.

Итоговый отчёт студента о проделанной самостоятельной работе в течение учебного семестра представляет собой типовую пояснительную записку, в которой в соответствии с рабочей программой дисциплины оформлены все расчётно-графические задания. Структура пояснительной записки включает титульный лист (*приложение В*), оглавление, выполненные расчётно-графические задания с соответствующими выводами и список использованной литературы.

Пояснительная записка должна быть выполнена в соответствии с общими требованиями и правилами оформления документов (*приложение Г*; [10]). Список использованных источников должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 [3, 6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безопасность и надёжность технических систем [Текст]: учеб. пособие / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, В.И. Круглов [и др.]. – М.: Изд-во «Логос», 2008. – 376 с.
2. ГОСТ Р 27.002-2009. Надёжность в технике термины и определения. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 2011. – 32 с.
3. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2004. – 54 с.
4. Дахин, О.Х. Надёжность технических систем [Текст]: учеб. пособие / О.Х. Дахин ; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2006. – 159 с.
5. Зубова, А.Ф. Надёжность машин и аппаратов химических производств [Текст] / А.Ф. Зубова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 214 с.
6. Методические указания по применению ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» / сост. Н.Н. Аржановская; ред. И.М. Рамзина, Н.С. Заруднева; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2009. – 18 с.
7. Надёжность технических систем [Текст]: учеб. пособие / Е.В. Сугак, Н.В. Василенко, Г.Г. Назаров [и др.]; под общ. ред. Е.В. Сугак, Н.В. Василенко. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001. – 608 с.
8. Обеспечение и методы оптимизации надёжности химических и нефтеперерабатывающих производств [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г. Грун [и др.]. – М.: Изд-во «Химия», 1987. – 272 с.
9. Проников, А.С. Надёжность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
10. Стандарт предприятия. Система управления качеством подготовки специалистов. Общие требования и правила оформления. СТП ВолгГТУ 025-02. – Волгоград, 2002. – 34 с.
11. Труханов, В.М. Краткий курс теории и практики надёжности сложных систем [Текст]: учеб. пособие / В.М. Труханов; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2008. – 160 с.
12. Ушаков, И.А. Курс теории надёжности систем [Текст]: учеб. пособие / И.А. Ушаков. – М.: Изд-во «Дрофа», 2008. – 240 с.
13. Шишмарёв, В.Ю. Надёжность технических систем [Текст]: учеб. / В.Ю. Шишмарёв. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 304 с.
14. Шубин, В.С. Надёжность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств [Текст]: учеб. пособие / В.С. Шубин, Ю.А. Рюмин. – М.: Изд-во «Химия», «КолосС», 2006. – 359 с.

Приложение А

№ варианта	№ схемы	Порядковый номер элемента															Тип соединения элементов в системе	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
		Показатель надёжности																
		<i>q</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>q</i>	<i>q</i>	« <i>m</i> из <i>n</i> »	«мост»
		Значение показателя надёжности															Метод расчёта*	
1	1	0,05	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,04	0,04	0,04	<i>a</i>	<i>z</i>
2	1	0,03	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	<i>z</i>	<i>в</i>
3	2	0,06	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,93	0,07	0,06	0,06	<i>б</i>	<i>a</i>
4	2	0,08	0,94	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,06	0,08	0,08	<i>a</i>	<i>z</i>
5	3	0,03	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,91	0,95	0,91	0,95	0,91	0,94	0,06	0,06	0,06	<i>б</i>	<i>a</i>
6	3	0,05	0,94	0,94	0,92	0,92	0,85	0,83	0,85	0,83	0,85	0,83	0,94	0,06	0,08	0,08	<i>a</i>	<i>б</i>
7	4	0,04	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,04	<i>в</i>	<i>б</i>
8	4	0,05	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,06	0,06	0,05	<i>б</i>	<i>в</i>
9	5	0,04	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,93	0,07	0,07	0,04	<i>z</i>	<i>a</i>
10	5	0,03	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,94	0,95	0,05	0,05	0,03	<i>б</i>	<i>в</i>
11	6	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	<i>б</i>	<i>в</i>
12	6	0,04	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,04	0,04	0,04	<i>a</i>	<i>z</i>
13	7	0,03	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94	0,06	0,06	0,06	<i>б</i>	<i>a</i>
14	7	0,07	0,75	0,75	0,75	0,75	0,97	0,97	0,75	0,75	0,75	0,75	0,95	0,05	0,05	0,05	<i>z</i>	<i>б</i>
15	8	0,04	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,95	0,05	0,05	0,04	<i>б</i>	<i>в</i>
16	8	0,03	0,93	0,94	0,93	0,92	0,94	0,92	0,93	0,92	0,93	0,94	0,96	0,04	0,04	0,03	<i>a</i>	<i>б</i>
17	9	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	<i>a</i>	<i>z</i>
18	9	0,04	0,94	0,94	0,95	0,94	0,96	0,94	0,95	0,96	0,96	0,95	0,94	0,04	0,04	0,04	<i>б</i>	<i>a</i>
19	10	0,07	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,92	0,08	0,08	0,08	<i>б</i>	<i>в</i>
20	10	0,06	0,92	0,92	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,09	0,06	0,06	<i>a</i>	<i>z</i>
21	11	0,04	0,97	0,94	0,96	0,97	0,94	0,96	0,95	0,94	0,91	0,95	0,94	0,09	0,06	0,04	<i>б</i>	<i>в</i>
22	11	0,03	0,95	0,93	0,94	0,95	0,92	0,94	0,96	0,93	0,89	0,96	0,92	0,89	0,07	0,03	<i>a</i>	<i>z</i>
23	12	0,12	0,79	0,79	0,83	0,80	0,83	0,80	0,83	0,88	0,89	0,88	0,89	0,08	0,09	0,07	<i>a</i>	<i>z</i>
24	12	0,10	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,87	0,91	0,87	0,91	0,06	0,06	0,06	<i>б</i>	<i>в</i>
*Примечание:																		
<i>a</i> – прямого перебора; <i>б</i> – комбинаторный; <i>в</i> – логических схем; <i>z</i> – метод относительно особого элемента																		

№ схемы	Структурная схема	№ схемы	Структурная схема
1		2	
3		4	
5		6	

7		8	
9		10	
11		12	

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Волгоградский государственный технический университет»

Факультет Механико-металлургический (Кировский вечерний)

Кафедра Процессы и аппараты химических и пищевых производств

СЕМЕСТРОВАЯ (КОНТРОЛЬНАЯ) РАБОТА
по дисциплине «Надёжность технических систем»

Автор _____
(подпись) (дата подписания) (фамилия, инициалы)

Форма обучения Очно-заочная (Заочная)

Программа обучения Полная (Сокращённая)

Группа _____
(шифр группы)

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие
процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии
(код, наименование направления)

Профиль подготовки Машины и аппараты химических производств
(наименование профиля)

Руководитель _____
работы (оценка и подпись) (дата подписания) (инициалы и фамилия)

Волгоград 20__ г.

Требования к оформлению пояснительной записки
(извлечение из СТП ВолгГТУ 025-02)

Пояснительная записка выполняется на бумаге формата А4. Основной текст – шрифт *Times New Roman*, 14 кегль, полуторный интервал, выравнивание по ширине. Абзацы в тексте начинают с отступом 15 мм. Расстановка переносов – авто. Размер полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 15 мм, нижнее – 20 мм.

Основной текст записки выполняется на листах без рамки, номера страниц проставляются арабскими цифрами в правом нижнем углу без точки. На титульном листе номер страницы не ставится, но включается в общую нумерацию страниц.

Опечатки допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской с нанесением затем исправленного текста.

Каждый раздел начинается с новой страницы с указанием его номера по оглавлению. Номера и заголовки разделов, подразделов нумеруют арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Переносы слов в заголовках, в названиях рисунков и таблиц не допускаются. После заголовка перед текстом оставляют пустую строку.

Формулы и уравнения следует выделять из текста, в отдельную строку и располагать по центру страницы. Нумерация формул по правому краю в круглых скобках (нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте). Формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той же последовательности, в которой символы приведены

в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия. Набирать формулы следует в редакторе формул *Equation*.

Иллюстрации (рисунки, схемы, диаграммы) должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются, или на следующей странице. Располагать рисунки и подписи к ним следует по центру страницы. Рисунки нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. Слово «Рисунок» и название располагают после поясняющих его данных.

Таблицы должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются, или на следующей странице. Таблицы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. В конце заголовков таблиц точки не ставят. Слово «Таблица» пишут слева без абзацного отступа.

При переносе таблицы на новую страницу слева без абзацного отступа пишется «Продолжение таблицы».

Ссылки на использованные источники приводятся по тексту в квадратных скобках, внутри которых ставится номер источника по «Списку использованных источников», приводимого в конце пояснительной записки. Список использованных источников составляют по мере упоминания источников или в алфавитном порядке.

Составитель:

Андрей Евгеньевич **Новиков**,

Наталия Валентиновна **Шибитова**

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Структурная надёжность

(краткий курс лекций и задания для выполнения СРС)

Учебное пособие

Темплан 2016 г. Поз. № 43.

Подписано в печать ____ 2016 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага газетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л. ____ . Тираж ____ экз. Заказ ____ .

Волгоградский государственный технический университет.

400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ

400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп.